


# Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen

 Bericht über Ergebnisse des Messprojekts 2013-2015



Baden-Württemberg



# Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen

 Bericht über Ergebnisse des Messprojekts 2013-2015



Baden-Württemberg

<b>AUFTRAGGEBER</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Referat 42 Internet: <a href="http://um.baden-wuerttemberg.de">um.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe Internet: <a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a>
<b>BEARBEITUNG</b>	U. Ratzel, O. Bayer, P. Brachat, M. Hoffmann, K. Jänke, K.-J. Kiesel, C. Mehnert, Dr. C. Scheck LUBW Referat 34 – Technischer Arbeitsschutz, Lärmschutz Kontakt: <a href="mailto:windenergie@lubw.bwl.de">windenergie@lubw.bwl.de</a>  Dr. C. Westerhausen, Dr. K.-G. Krapf, L. Herrmann, J. Blaul Wölfel Engineering GmbH + Co. KG, Höchberg 
<b>BILDNACHWEIS</b>	Titelseite: Fotolia (großes Bild), LUBW (drei kleine Bilder) Im Bericht ist die Quelle jeweils bei der Abbildung angegeben.
<b>DRUCK</b>	Agentur & Druckerei Murr GmbH, Karlsruhe
<b>STAND</b>	Februar 2016 (3. Auflage, Februar 2020)



Berichte und Anlagen dürfen nur unverändert weitergegeben werden. Eine auszugsweise Veröffentlichung ist ohne schriftliche Genehmigung der LUBW nicht gestattet.



<b>1</b>	<b>ANLASS UND EINFÜHRUNG</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>UNTERSUCHUNGSUMFANG</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>WINDKRAFTANLAGEN</b>	<b>17</b>
4.1	Messungen und Auswertungen	19
4.2	Geräusche Windenergieanlage 1: REpower MM92 – 2,0 MW	19
4.3	Geräusche Windenergieanlage 2: Enercon E-66 – 1,8 MW	25
4.4	Geräusche Windenergieanlage 3: Enercon E-82 – 2,0 MW	29
4.5	Geräusche Windenergieanlage 4: REpower 3.2M114 – 3,2 MW	34
4.6	Geräusche Windenergieanlage 5: Nordex N117 – 2,4 MW	40
4.7	Geräusche Windenergieanlage 6: Enercon E-101 – 3,05 MW	45
4.8	Erschütterungen Windenergieanlage 5: Nordex N117 – 2,4 MW	50
4.9	Messergebnisse aus der Literatur	54
4.10	Fazit der Messungen an Windenergieanlagen	57
<b>5</b>	<b>STRASSENVERKEHR</b>	<b>59</b>
5.1	Innerstädtische Straßen – Messung Würzburg	59
5.2	Innerstädtische Straßen – Dauermessstationen Karlsruhe und Reutlingen	64
5.3	Autobahn – Messung bei Malsch	65
5.4	Innengeräusche Pkw während der Fahrt	67
5.5	Fazit der Straßenverkehrsmessungen	67
<b>6</b>	<b>STÄDTISCHER HINTERGRUND</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>GERÄUSCHQUELLEN IN WOHNGEBÄUDEN</b>	<b>75</b>
7.1	Waschmaschine	75
7.2	Heizung und Kühlschrank	76
<b>8</b>	<b>NATÜRLICHE QUELLEN</b>	<b>79</b>
8.1	Ländliche Umgebung	79
8.2	Meeresbrandung	84
<b>9</b>	<b>KONZEPTION EINER DAUERMESSSTATION FÜR TIEFFREQUENTE GERÄUSCHE</b>	<b>85</b>
9.1	Aufgabenstellung	85
9.2	Konzept	85
9.3	Einzelmodule zur Datenerfassung	85
9.4	Zentrale Datenauswertung	87
9.5	Anwendbarkeit und Nutzen	88

<b>ANHANG A1 – ALLGEMEINE INFORMATIONEN</b>	<b>89</b>
A1.1 Tieffrequente Geräusche und Infraschall	89
A1.2 Ausbreitung	89
A1.3 Auftreten und Vorkommen	90
A1.4 Bewertung	90
A1.5 Wahrnehmung	90
<b>ANHANG A2 – QUELLEN UND LITERATUR</b>	<b>93</b>
<b>ANHANG A3 – ERLÄUTERUNG VON BEGRIFFEN UND GRÖSSEN</b>	<b>95</b>
<b>ANHANG A4 – VERWENDETE MESSSYSTEME</b>	<b>101</b>

# 1 Anlass und Einführung

Derzeit (Stand 31.12.2015) sind in Baden-Württemberg 445 Windenergieanlagen <sup>1)</sup> in Betrieb und 100 weitere im Bau. In den nächsten Jahren werden viele weitere hinzukommen. Beim Ausbau der Windenergie müssen die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt berücksichtigt werden. Windenergieanlagen verursachen Geräusche; neben dem gewöhnlichen Hörschall erzeugen sie auch tieffrequente Geräusche bzw. Infraschall, also extrem tiefe Töne.

Als Infraschall bezeichnet man den Frequenzbereich unterhalb von 20 Hertz (Erläuterungen wichtiger Fachbegriffe finden sich in Anhang A3). Physikalisch entstehen die Geräusche vor allem durch aerodynamische und mechanische Prozesse, z. B. die An- und Umströmung der Rotorblätter, Maschinengeräusche oder Schwingungen von Anlagenkomponenten. Für die tieffrequenten Geräuschanteile ist unser Gehör sehr unempfindlich. Im Windenergieerlass des Landes Baden-Württemberg [1] finden sich u. a. Regelungen bzw. Aussagen zum Schutz der Bevölkerung vor tieffrequenten Geräuschen und Infraschall. Im Rahmen des Windenergieausbaus werden jedoch immer wieder Befürchtungen geäußert, dass dieser Infraschall Menschen beeinträchtigen oder ihre Gesundheit gefährden könne.

Im September 2012 legte die LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg das Konzept für ein Messprojekt vor, mit dem aktuelle Daten über tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von

Windkraftanlagen und anderen Quellen erhoben werden sollten. Daraufhin wurde die LUBW vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit der Durchführung des Projekts beauftragt. Als unterstützendes Messinstitut wurde die Fa. Wölfel Beratende Ingenieure GmbH gewonnen. Gemeinsam konnte Anfang 2013 mit den Detailplanungen und Arbeiten begonnen werden.

Im Rahmen des Projektes wurden zahlreiche Messungen an Windkraftanlagen und anderen Quellen sowie damit verbundene Auswertungen und Analysen durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse sind in diesem Messbericht zusammengefasst. Die LUBW möchte damit zur Versachlichung der Diskussion beitragen. Der Bericht wendet sich sowohl an interessierte Bürgerinnen und Bürger als auch an Verwaltungen und Fachleute.

An dieser Stelle danken wir allen Beteiligten für die Ermöglichung der Messungen und die freundliche Unterstützung bei der Durchführung, insbesondere den Betreibern der Windenergieanlagen, den beteiligten Verwaltungsbehörden in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, dem Staatlichen Museum für Naturkunde Karlsruhe sowie dem Schulamt Karlsruhe. Das Bayerische Landesamt für Umwelt und das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern stellten dankenswerterweise einige Abbildungen zur Verfügung.

---

1) Die Bezeichnungen „Windenergieanlage“ (oftmals abgekürzt als WEA) und „Windkraftanlage“ (WKA) sind synonym. Für unser Messprojekt verwenden wir im Titel die Bezeichnung „Windkraftanlage“. Dieser Begriff ist im Immissionsschutzrecht verankert (Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV, Anhang 1 Nr. 1.6.1 [2] [3]). Im Text dieses Berichtes wird auch häufig der gängige Begriff „Windenergieanlage“ benutzt.



## 2 Zusammenfassung

Die LUBW führte seit 2013 zusammen mit der Fa. Wölfel Beratende Ingenieure GmbH das Messprojekt „Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen“ durch. Dieser Bericht informiert über die Ergebnisse des Messprojektes.

Ziel des Projektes ist es, aktuelle Daten über das Auftreten von Infraschall (ab 1 Hz) und tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Windkraftanlagen und weiteren Quellen zu erheben. Hierzu wurden bis Ende 2015 Messungen in der Umgebung von sechs Windkraftanlagen unterschiedlicher Hersteller und Größe durchgeführt, die einen Leistungsbereich von 1,8 bis 3,2 Megawatt (MW) abdecken. Die Abstände zu den Anlagen lagen, je nach örtlicher Gegebenheit, um 150 m, 300 m und 700 m. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Messungen an den Windkraftanlagen beschrieben und anhand von Grafiken dargestellt. Ergänzend zu den schalltechnischen Untersuchungen wurden in der Umgebung einer Windkraftanlage Erschütterungsmessungen durchgeführt, um mögliche Schwingungsemissionen der Anlage auf die Umgebung festzustellen. Die Vorgehensweise und die aufgetretenen Schwierigkeiten werden jeweils erläutert.

Da auch der Straßenverkehr als Quelle von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen gilt, lag es nahe, das Messprojekt auf diesen hin auszudehnen. In Kapitel 5 finden sich Ergebnisse einer Messung an einer städtischen Straße, die sowohl außerhalb als auch innerhalb einer Wohnung stattfand. Außerdem wurden die Daten der LUBW-Messstationen für Straßenverkehrslärm in Karlsruhe und Reutlingen im Hinblick auf tieffrequente Geräusche und Infraschall ausgewertet und dargestellt. Zudem werden Ergebnisse eigener Messungen an einer Bundesautobahn dargestellt. Ergänzt wird dies durch Daten aus Schallpegelmessungen im Inneren eines fahrenden Pkw.

Messungen ohne Quellenbezug am Tage und in der Nacht erfolgten in der Karlsruher Innenstadt auf dem Friedrichsplatz. Parallel dazu wurde auf dem Dach des Naturkundemuseums und in einem Innenraum des Schulamtes Messungen vorgenommen (Kapitel 6). Typische in Wohngebäuden auftretende Geräusche durch weit verbreitete



**Abbildung 2-1:** Windkraftanlagen – wieviel Infraschall senden sie aus? Foto: Fa. Wölfel

technische Geräte wie Waschmaschine, Kühlschrank oder Heizung wurden ebenfalls erfasst und sind in Kapitel 7 dargestellt. Um auch Aussagen über natürliche Infraschallquellen machen zu können, wurden Messungen auf freiem Feld, am Waldrand und im Wald durchgeführt; aus der Literatur wird eine Messung der durch Meeresbrandung hervorgerufenen tieffrequenten Geräusche vorgestellt (Kapitel 8). In Kapitel 9 sind Überlegungen für eine Messstation zur fortlaufenden Erfassung tieffrequenter Geräusche inkl. Infraschall aufgenommen. Eine solche autark arbeitende Dauermessstation könnte ggf. im Rahmen von besonderen Beschwerdefällen zum Einsatz kommen.

Der vorliegende Bericht erweitert den vorangegangenen Zwischenbericht um weitere Erkenntnisse und enthält eine Vielzahl von Messergebnissen. Er richtet sich sowohl an Fachleute als auch an interessierte Bürgerinnen und Bürger. Während der gesamten Projektlaufzeit bestand großes Interesse seitens der Öffentlichkeit und der Verwaltungen an unseren Untersuchungen; über eine Messung wurde im SWR-Fernsehen berichtet. Die LUBW wird das Thema auch zukünftig weiter verfolgen.

Die Anhänge bieten neben allgemeinen Informationen zum Thema Infraschall umfangreiche Erläuterungen zu Fachbegriffen und zur verwendeten Technik sowie Angaben zu den Quellen.



**Abbildung 2-2:** Impressionen von den Messungen während der Durchführung des Messprojektes. a) Aufbau eines Windmessmastes (oben links) und b) eines Messpunkts (oben rechts) bei der Messung an einer Windenergieanlage. c) und d) Aufbau von Messpunkten in der Karlsruher Innenstadt (unten). Fotos: LUBW

## ERGEBNISSE

Zusammenfassend ergeben sich aus den Messungen folgende Erkenntnisse:

- Der von Windenergieanlagen ausgehende Infraschall kann in der näheren Umgebung der Anlagen prinzipiell gut gemessen werden. Unterhalb von 8 Hz treten im Frequenzspektrum diskrete Linien auf, welche auf die gleichförmige Bewegung der einzelnen Rotorblätter zurückzuführen sind.
- Die Infraschallpegel in der Umgebung von Windkraftanlagen liegen bei den durchgeführten Messungen auch im Nahbereich – bei Abständen zwischen 120 m und 300 m – deutlich unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle gemäß DIN 45680 (Entwurf 2013) [5] bzw. **Tabelle A3-1**.

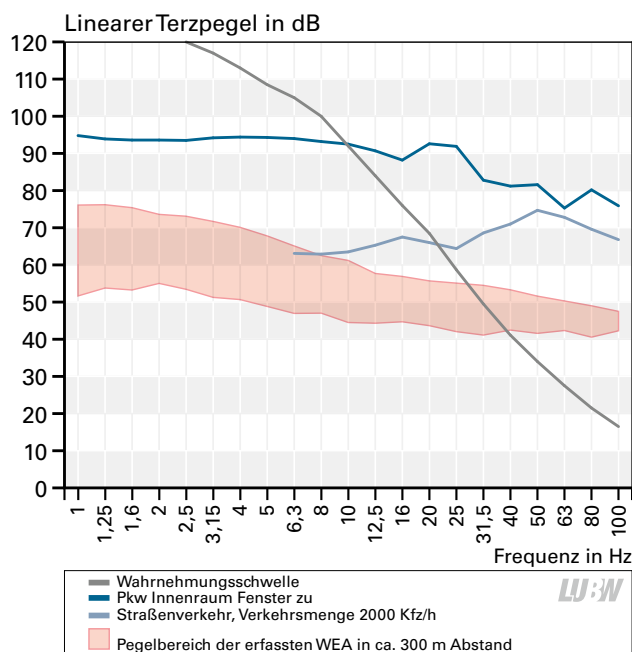
- In 700 m Abstand von den Windenergieanlagen war bei den Messungen zu beobachten, dass sich beim Einschalten der Anlage der gemessene Infraschall-Pegel nicht mehr nennenswert oder nur in geringem Umfang erhöht. Der Infraschall wurde im Wesentlichen vom Wind erzeugt und nicht von den Anlagen.
- Die ermittelten G-bewerteten Pegel <sup>2)</sup> lagen in Entfernungen zwischen 120 m und ca. 190 m bei eingeschalteter Anlage zwischen 55 dB(G) und 80 dB(G), bei ausgeschalteter Anlage zwischen 50 dB(G) und 75 dB(G). In

2) Der G-Pegel – angegeben als dB(G) – stellt einen frequenzgewichteten Einzahlwert der Geräusche im tieffrequenten Frequenz- und Infraschallbereich dar. Das menschliche Gehör ist für Einwirkungen in diesem Frequenzbereich unempfindlich (Definition und Bewertungskurve siehe Anhang A3).



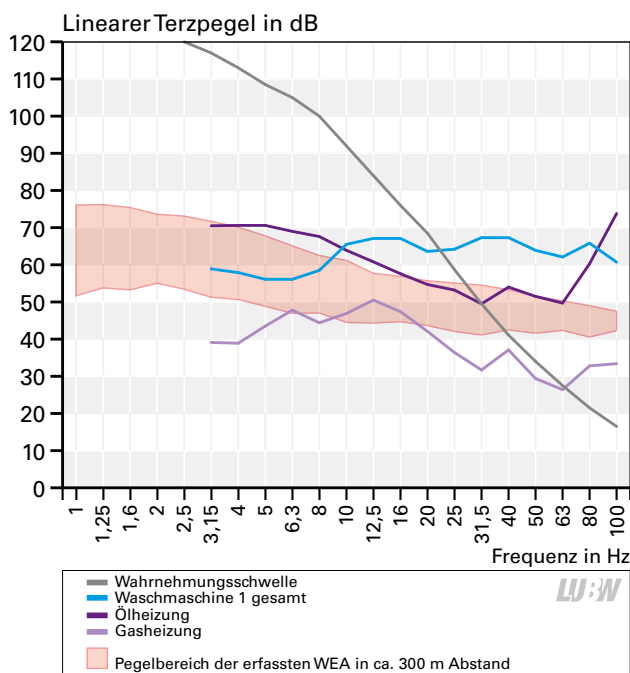
Entfernungen von 650 m und 700 m lagen die G-Pegel sowohl bei ein- als auch bei ausgeschalteter Anlage zwischen 50 dB(G) und 75 dB(G), siehe **Tabelle 2-1**. Die großen Schwankungsbreiten entstehen u. a. durch die vom Wind hervorgerufenen stark schwankenden Geräuschanteile sowie unterschiedliche Umgebungsbedingungen.

- Der in der Umgebung von laufenden Windenergieanlagen gemessene Infraschall und die tieffrequenten Geräusche setzen sich zusammen aus einem Anteil, der durch die Windenergieanlage erzeugt wird, einem Anteil der durch den Wind selbst in der Umgebung entsteht und aus einem Anteil, der am Mikrofon durch den Wind induziert wird. Der Wind selbst ist hier somit stets ein „Störfaktor“ bei der Ermittlung der Anlagengeräusche. Die Messwerte unterliegen deshalb prinzipiell einer breiten Streuung.
- Die von der untersuchten Windkraftanlage ausgehenden Erschütterungen waren bereits in weniger als 300 m Abstand sehr gering. In Entfernungen, wie sie sich für Bereiche mit Wohnnutzung allein aus Gründen des Schallimmissionsschutzes ergeben, sind an Wohngebäuden keine relevanten Einwirkungen zu erwarten.
- Die Messungen der vom Straßenverkehr ausgehenden tieffrequenten Geräusche inkl. Infraschall konnten in Zeiten ohne störende Windgeräusche durchgeführt werden. Anders als bei Windenergieanlagen treten die gemessenen Pegel unmittelbar auch dort auf, wo sich angrenzend Wohnbebauung befindet. Erwartungsgemäß konnte beobachtet werden, dass die Infraschall- und tieffrequenten Geräuschpegel nachts absanken. Es konnten auch eindeutige Korrelationen mit der Verkehrsstärke festgestellt werden. Je höher das Verkehrsaufkommen, desto höher waren die tieffrequenten Geräusch- und Infraschallpegel.
- Die Infraschallpegel des Straßenverkehrs im Bereich nahe gelegener Wohnbebauung lagen in den einzelnen Terzbändern maximal bei knapp 70 dB (unbewertet), der G-bewertete Pegel im Bereich zwischen 55 dB(G) und 80 dB(G).

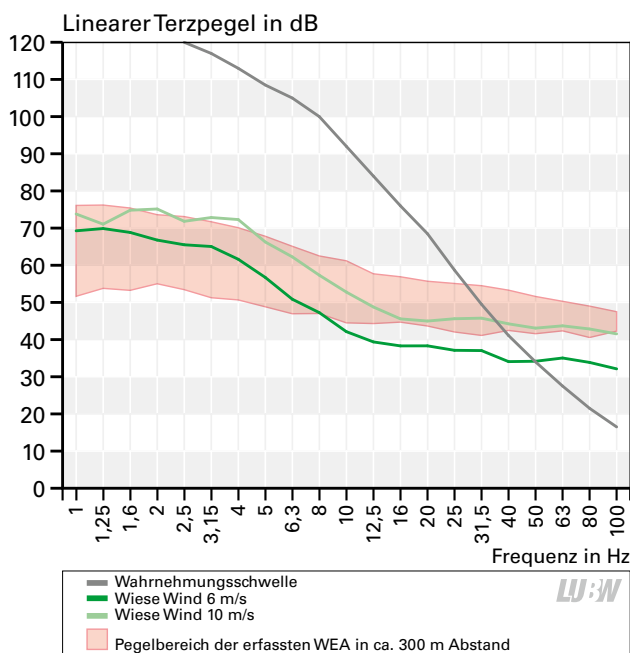


**Abbildung 2-3:** Vergleich der Fahrgeräusche inner- und außerhalb von Kraftfahrzeugen mit dem Pegelbereich von WEA in etwa 300 m Abstand sowie der Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 hinsichtlich Infraschall und tieffrequenten Geräuschen. Zu Messkorrekturen siehe Abschnitt 4.1.

- Bei den Immissionsmessungen des Straßenverkehrslärms konnten in den Frequenzspektren erhöhte Pegelwerte im Bereich zwischen etwa 30 und 80 Hz festgestellt werden. Tieffrequente Geräusche in diesem Bereich liegen deutlich oberhalb der Wahrnehmungsschwelle nach **Tabelle A3-1** und sind daher hinsichtlich ihrer Wirkungen relevanter als die unterschwelligeren Infraschallpegel unterhalb 20 Hz. Die Pegel der tieffrequenten Geräusche bei den betrachteten Situationen des Straßenverkehrs liegen signifikant höher als in der Umgebung von Windenergieanlagen (**Tabelle 2-1**).
- Bei den Messungen in der Karlsruher Innenstadt (Friedrichsplatz) konnte beobachtet werden, dass der G-bewertete Pegel von tagsüber 65 dB(G) auf Nachtwerte um 50 dB(G) absank. Windgeräusche spielten bei diesen Messungen keine Rolle. Zwischen 25 und 80 Hz konnten relativ hohe Terzpegel bis zu 60 dB (unbewertet) festgestellt werden, die wohl auf Verkehrsgläusche zurückzuführen sind, auch wenn der Friedrichsplatz nicht direkt an eine viel befahrene Straße angrenzt.



**Abbildung 2-4:** Vergleich der Geräusche von technischen Geräten in Wohngebäuden mit dem Pegelbereich von WEA in etwa 300 m Abstand sowie der Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 hinsichtlich Infraschall und tieffrequenten Geräuschen. Zu Messkorrekturen siehe Abschnitt 4.1.



**Abbildung 2-5:** Vergleich der Geräuschesituation im freien Feld (ohne Quellenbezug) mit dem Pegelbereich von WEA in etwa 300 m Abstand sowie der Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 hinsichtlich Infraschall und tieffrequenten Geräuschen. Zu Messkorrekturen bei WEA siehe Abschnitt 4.1.

- Die höchsten Pegel wurden im Rahmen des Messprojekts im Innenraum eines mit 130 km/h fahrenden Mittelklasse-Pkw gemessen. Hierbei handelt es sich zwar nicht um Immissionspegel, die in der freien Umgebung

auftreten, aber um eine Alltagssituation, der viele Menschen immer wieder auch für längere Zeit ausgesetzt sind. Die gemessenen Werte liegen sowohl beim Infraschall als auch im übrigen tieffrequenten Bereich um mehrere Größenordnungen über den ansonsten im Straßenverkehr oder an den Windenergieanlagen gemessenen Werten.

- Bei Messungen an technischen Geräten in einem Wohngebäude wurden die höchsten Infraschallpegel während des Schleudergangs von Waschmaschinen erfasst. In einzelnen Terzen reichen die Pegel an die Wahrnehmungsschwelle nach **Tabelle A3-1** heran. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass Gebäudebauteile die höherfrequenten Geräuschteile deutlich besser dämmen als die tiefen Frequenzen unter 20 Hz.
- In ländlicher Umgebung ist die spektrale Verteilung der Geräusche auf einer Wiese, am Waldrand und im Wald bei Wind prinzipiell ähnlich wie in der Umgebung einer Windkraftanlage (**Abbildung 2-5**). Für offenes Gelände zeigen sich im Schmalbandspektrum um bis zu 30 dB höhere lineare Pegel als im Wald. Oberhalb 16 Hz sind die Unterschiede nicht mehr so stark ausgeprägt. Beim A-bewerteten Hörschall treten im Wald höhere Pegel auf, was auf Blätterrauschen zurückzuführen ist.

## FAZIT

Infraschall wird von einer großen Zahl unterschiedlicher natürlicher und technischer Quellen hervorgerufen. Er ist alltäglicher und überall anzutreffender Bestandteil unserer Umwelt. Windkraftanlagen leisten hierzu keinen wesentlichen Beitrag. Die von ihnen erzeugten Infraschallpegel liegen deutlich unterhalb der Wahrnehmungsgrenzen des Menschen. Es gibt keine wissenschaftlich abgesicherten Belege für nachteilige Wirkungen in diesem Pegelbereich.

Auch für den Frequenzbereich des Hörschalls zeigen die Messergebnisse keine akustischen Auffälligkeiten. Windkraftanlagen können daher wie andere Anlagen nach den Vorgaben der TA Lärm beurteilt werden. Bei Einhaltung der rechtlichen und fachtechnischen Vorgaben für die Planung und Genehmigung sind keine schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche von Windkraftanlagen zu erwarten.



**Tabelle 2-1:** Vergleichende Übersicht der Ergebnisse. Die Messwerte unterlagen häufig erheblichen Schwankungen. Sie wurden hier auf 5 dB gerundet, teilweise liegen unterschiedliche Mittelungszeiten zugrunde. Näheres findet sich in den entsprechenden Kapiteln des Berichts. Für den Vergleich der Ergebnisse (Messungen mit / ohne schallharte Platte) wurde eine Korrektur durchgeführt; Näheres hierzu siehe Abschnitt 4.1.

Quelle/Situation	Kapitel	G-bewertete Pegel in dB(G)	Infraschall- Terzpegel ≤ 20 Hz in dB <sup>1)</sup>	Tieffrequente Terzpegel 25-80 Hz in dB <sup>1)</sup>
<b>Windenergieanlagen <sup>2)</sup></b>				
		<b>WEA an / aus</b>	<b>WEA an</b>	<b>WEA an</b>
– WEA 1	4.2	700 m: 55-75 / 50-75 150 m: 65-75 / 50-70	– 150 m: 55-70	– 150 m: 50-55
– WEA 2	4.3	240 m: 60-75 / 60-75 120 m: 60-80 / 60-75	– 120 m: 60-75	– 120 m: 50-55
– WEA 3	4.4	300 m: 55-80 / 50-75 180 m: 55-75 / 50-75	– 180 m: 50-70	– 180 m: 45-50
– WEA 4	4.5	650 m: 50-65 / 50-65 180 m: 55-65 / 50-65	– 180 m: 45-55	– 180 m: 40-45
– WEA 5	4.6	650 m: 60-70 / 55-65 185 m: 60-70 / 55-65	– 185 m: 50-65	– 185 m: 45-50
– WEA 6	4.7	705 m: 55-65 / 55-60 192 m: 60-75 / 55-65	– 192 m: 55-65	– 192 m: 45-50
<b>Straßenverkehr</b>				
– Würzburg innerorts, Balkon <sup>3)</sup> – Würzburg innerorts, Wohnraum <sup>3)</sup>	5.1	50-75 40-65	35-65 20-55	55-75 35-55
– Karlsruhe, Verkehrslärmmessstation <sup>3)</sup>	5.2	65-75	45-65	55-70
– Reutlingen, Verkehrslärmmessstation <sup>3)</sup>	5.2	70-80	50-70	55-75
– BAB A5 bei Malsch, 80 m <sup>4)</sup> – BAB A5 bei Malsch, 260 m <sup>4)</sup>	5.3	75 70	55-60 55-60	60-70 55-60
– Innengeräusche Pkw bei 130 km/h <sup>4)</sup> – Innengeräusche Kleinbus bei 130 km/h <sup>4)</sup>	5.4	105 100	90-95 85-90	75-95 80-90
<b>Städtischer Hintergrund, Karlsruhe <sup>3)</sup></b>				
– Dach Naturkundemuseum – Friedrichsplatz – Innenraum	6	50-65 50-65 45-60	35-55 35-50 20-45	bis 60 bis 60 bis 55
<b>Geräuschquellen in Wohngebäuden <sup>5)</sup></b>				
– Waschmaschine (alle Betriebsarten)	7.1	50-85	25-75	10-75
– Heizung (Öl und Gas, Volllast)	7.2	60-70	40-70	25-60
– Kühlschrank (Volllast)	7.2	60	30-50	15-35
<b>Ländliche Umgebung <sup>6)</sup></b>				
		<b>Wind 6 / 10 m/s</b>	<b>Wind 6 / 10 m/s</b>	<b>Wind 6 / 10 m/s</b>
– Wiese, 130 m vom Wald entfernt	8.1	50-65 / 55-65	40-70 / 45-75	35-40 / 40-45
– Waldrand	8.1	50-60 / 50-60	35-50 / 45-75	35-40 / 40-45
– Wald	8.1	50-60 / 50-60	35-40 / 40-45	35-50 / 35-40
<b>Meeresbrandung</b>				
– Strand, 25 m entfernt	8.2	75	55-70	keine Angabe
– Felsenkliff, 250 m entfernt	8.2	70	55-65	keine Angabe

1) Lineare Terzpegel (unbewertet)

2) Für Windenergieanlagen: Aus 10-Sekunden Werten (vgl. Abbildungen des G-Pegel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit)

3) Für Straßenverkehr (Würzburg) und Städtischer Hintergrund (Karlsruhe): Aus Mittelungspegeln über eine Stunde

4) Für Bundesautobahn und Pkw-Innenpegel: Aus Mittelungen über mehrere Minuten

5) Für Geräuschquellen im Wohngebäude: Aus Mittelungspegeln typischer Betriebszyklen

6) Die Windmessung erfolgte stets am Messpunkt MP1 (Wiese).



### 3 Untersuchungsumfang

Der Untersuchungsumfang umfasst folgende Messungen und Ermittlungen:

- Messung tieffrequenter Geräusche inkl. Infraschall ab 1 Hz an insgesamt sechs unterschiedlichen Windkraftanlagen im Abstand von jeweils rund 150 m, 300 m und 700 m (soweit möglich). Die Anlagen wurden dabei jeweils ein- und ausgeschaltet. Die Abstände entsprechen in etwa dem festgelegten Referenzabstand für Emissionsmessungen im Nahbereich (um 150 m), einem etwa doppelt so großen Abstand in der näheren Umgebung (um 300 m) und einem Abstand, wie er bei realen Schallimmissionen auftreten kann (700 m, vgl. auch Planungshinweise im Windenergieerlass Baden-Württemberg [1]).
- Vergleichsmessung der Geräuschimmissionen im Einwirkungsbereich einer Straße sowohl außerhalb als auch innerhalb eines Wohngebäudes.
- Ermittlung tieffrequenter Einwirkungen ab 6,3 Hz von Straßenverkehr an den Dauermessstationen in Karlsruhe und Reutlingen sowie an der Bundesautobahn A5 in der Nähe von Malsch in unterschiedlichen Entfernungen.
- Messung der Infraschallpegel innerhalb eines mit 130 km/h fahrenden Pkw.
- Ermittlung des städtischen Hintergrunds durch eine Vergleichsmessung der Geräuschsituation in Karlsruhe (Friedrichsplatz) ohne konkreten Quellenbezug sowohl außerhalb als auch innerhalb eines Gebäudes.
- Vergleichsmessung der Geräuschsituation in ländlicher Umgebung ohne konkreten Quellenbezug.

- Messung von Schwingungen (Erschütterungen) im Boden in der Umgebung einer Windkraftanlage.

- Erarbeitung eines Machbarkeitskonzeptes für die Konzeption einer autark arbeitenden Dauermessstation für tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall, um ggf. über einen längeren Zeitraum (z. B. mehrere Wochen) die Einwirkungen erfassen zu können.

Folgende geplanten Teilschritte des Projekts sind derzeit noch nicht abgeschlossen:

- Messung der Richtungsabhängigkeit im tieffrequenten Frequenzbereich anhand von vier Messpunkten um eine Windkraftanlage herum.  
Hier traten bei der Messung technische Probleme auf; die Erhebungen müssen wiederholt werden.
- Messung tieffrequenter Geräusche inkl. Infraschall ab 1 Hz an einem Windpark, inkl. Innenmessung in einem Wohnhaus in ca. 700 m Abstand zur nächstgelegenen Anlage. Die Anlagen werden dabei ein- und ausgeschaltet.  
Die notwendigen meteorologischen Bedingungen traten am geplanten Messort seit der Auftragsvergabe im August 2014 nicht auf. Daher konnte eine normgerechte Messung nicht durchgeführt werden. Die Messung soll nachgeholt werden.



## 4 Windkraftanlagen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der sechs Messungen dargestellt, die im Rahmen dieses Projekts an Windkraftanlagen in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern erfolgten (**Tabelle 4-1**). Diese Messungen wurden von der Fa. Wölfel Beratende Ingenieure, Höchberg, im Auftrag der LUBW durchgeführt. Wesentlicher Bestandteil sind dabei die grafischen Darstellungen der Emissionen bzw. Immissionen im tieffrequenten Bereich jeweils bei ein- und ausgeschalteter Anlage. Die Terzpegel ermöglichen einen Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmungsschwelle. Die A- und G-bewerteten Schalldruckpegel werden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für drei unterschiedliche Entfernungen von der Anlage dargestellt. Der A-bewertete Schallpegel – angegeben als dB(A) – bildet die menschliche Hörempfindlichkeit nach. Der G-Pegel – angegeben als dB(G) – stellt einen Einzahlwert dar, welcher nur Infraschall und Teile des tieffrequenten Frequenzbereiches bewertet. Für diese Frequenzbereiche ist das menschliche Gehör sehr unempfindlich (Näheres siehe **Abbildung A3-1** im Anhang A3). Zusätzlich aufgenommene Schmalbandspektren, alle angegeben mit einer Auflösung von 0,1 Hz, können einige Besonderheiten der Geräuschcharakteristik von Windenergieanlagen deutlicher zeigen. Die Pegelwerte in einem Spektrum hängen von der gewählten Auflösung ab. Daher können Schmalbandpegel nicht mit Terzpegeln verglichen werden. Für Vergleiche mit der Hörschwelle sind nur Terzpegel geeignet, da sich diese ebenfalls auf Terzpegel bezieht.

Alle im Folgenden gezeigten Ergebnisse von Messungen an laufenden Windkraftanlagen beinhalten auch die Geräusche, die der Wind selbst in der Umgebung verursacht.

Zudem werden bei stärkerem Wind trotz Verwendung doppelter Windschirme unvermeidbar auch an den Mikrofonen Geräusche induziert. Daher können die Ergebnisse einer Messung nicht der jeweiligen Windkraftanlage allein zugeschrieben werden. Umso wichtiger sind die Unterschiede, die sich durch Vergleich von Situationen mit ein- und ausgeschalteter Anlage ergeben. Bei den Geräuschmessungen an Straßen (Kapitel 5) und in der Innenstadt (Kapitel 6) spielen die mit dem Wind zusammenhängenden Effekte keine Rolle. Somit kennzeichnen die Messergebnisse an Windkraftanlagen und Straßen unterschiedliche Situationen, die nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Die Auswahl der Windenergieanlagen, an welchen die Messungen erfolgen sollten, gestaltete sich schwierig. Die ersten Kontakte zu Betreibern wurden dankenswerterweise von einigen baden-württembergischen Genehmigungsbehörden (Landratsämtern) vermittelt, nachdem die LUBW eine entsprechende Abfrage im Land durchgeführt hatte. Die Teilnahme der Anlagenbetreiber erfolgte auf freiwilliger Basis. Einige Betreiber hatten Bedenken, an dem Projekt mitzuwirken.

Zunächst wurden die Standorte aus akustischer Sicht qualifiziert. Standorte in der Nähe viel befahrener Straßen oder sonstiger störender Geräuschquellen – dazu gehörte auch Wald – wurden als ungeeignet verworfen. Für leistungsstärkere Anlagen musste die Standortsuche der LUBW auf Rheinland-Pfalz ausgedehnt werden. Auch hier erfolgte mehrfach eine konstruktive Unterstützung durch die Behörden. Im Verlauf des Projektes waren nicht nur

**Tabelle 4-1:** Übersicht über die Windenergieanlagen, an denen im Rahmen dieses Projekts Messungen durchgeführt wurden. Die einzelnen Anlagen und die zugehörigen Ergebnisse werden in den Abschnitten 4.2 bis 4.7 näher beschrieben.

Windenergieanlage	WEA 1	WEA 2	WEA 3	WEA 4	WEA 5	WEA 6
<b>Hersteller Typ</b>	REpower* MM92	Enercon E-66	Enercon E-82	REpower* 3.2M114	Nordex N117/2400	Enercon E-101
<b>Nennleistung</b>	2,0 MW	1,8 MW	2,0 MW	3,2 MW	2,4 MW	3,05 MW
<b>Rotordurchmesser</b>	92 m	70 m	82 m	114 m	117 m	101 m
<b>Nabenhöhe</b>	100 m	86 m	138 m	143 m	140,6 m	135,4 m

\* Seit 2014 Fa. Senvion

wetterbedingte Einschränkungen zu bewältigen (passende Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten; Starkwind mit Messabbruch wegen automatischer Anlagenabschaltung; Schneedecke in der Umgebung). Eine Anlage war kurz vor der Messung defekt und fiel für längere Zeit aus. Ein Betreiber zog seine Zusage für eine Messung wieder zurück, weil die vorgesehene Anlage Probleme bei der Ab-

nahmemessung zeigte. In der Umgebung einer anderen Anlage wurde eine Baustelle eingerichtet, welche Fremdgeräusche verursachte und dadurch die Messung der Anlagengeräusche unmöglich machte. Dies soll nur die Herausforderungen andeuten, welche bei der Projektbearbeitung auftraten. Die in der Folge auftretenden Verzögerungen waren nicht von vornherein absehbar.



**Abbildung 4-1:** Typbild WEA 1, REpower MM92



**Abbildung 4-2:** Typbild WEA 2, Enercon E-66



**Abbildung 4-3:** Typbild WEA 3, Enercon E-82



**Abbildung 4-4:** Typbild WEA 4, REpower 3.2M114



**Abbildung 4-5:** Typbild WEA 5, Nordex N117/2400



**Abbildung 4-6:** Typbild WEA 6, Enercon E-101

Diese Bilder vermitteln einen Eindruck von den untersuchten Anlagen, die den verbreiteten Leistungsbereich zwischen 1,8 MW und 3,2 MW abdecken. Die Nabenhöhe variiert zwischen 86 m und 143 m, der Rotordurchmesser zwischen 70 m und 117 m. Fotos: batcam.de (linke Spalte), LUBW (Abb. 4-2 und 4-4), Lucas Bauer wind-turbine-models.com (Abb. 4-6)

## 4.1 Messungen und Auswertungen

Die Schallpegelmessungen wurden nach DIN EN 61400-11 [6] bzw. nach der Technischen Richtlinie für Windenergieanlagen [7] vorgenommen. Darüber hinaus wurden die Schallimmissionen im tieffrequenten Bereich ab 1 Hz erfasst und ggf. weitere Richtlinien herangezogen [8] [9].

Diese Vorschriften beschreiben Geräuschemessverfahren zur Bestimmung der Schallemission einer Windenergieanlage. Sie legen die Verfahren zur Messung, Auswertung und Ergebnisdarstellung der Geräuschemission von Windenergieanlagen fest. Ebenso sind Anforderungen an die Messgeräte und Kalibrierung vorgegeben, um die Genauigkeit und Einheitlichkeit der akustischen und anderen Messungen sicherzustellen. Hier wurden darüber hinaus ab 1 Hz verwendbare Spezialmikrofone verwendet. Die nicht-akustischen Messungen, die notwendig sind, um die für die Ermittlung der Geräuschemission relevanten atmosphärischen Bedingungen zu bestimmen, sind ebenfalls näher erläutert. Angeführt sind alle zu messenden und darzustellenden Parameter sowie die zur Bestimmung dieser Parameter notwendige Datenverarbeitung. Näheres zur Messtechnik findet sich in Anhang A4.

Aufgrund der Messungen, die – wenn möglich – jeweils in Entfernungen von etwa 150 m, 300 m und 700 m zur Anlage erfolgen sollten (nicht immer war die exakte Einhaltung dieser Abstände möglich), lassen sich Aussagen über Emissionen und Immissionen der Anlagen machen. Die zu messenden Windenergieanlagen wurden jeweils im offenen Betriebsmodus betrieben, dabei ist die Anlagensteuerung auf Leistungsoptimierung ausgerichtet. Erfahrungsgemäß sind in diesem Betriebsmodus die höchsten Schallemissionen zu erwarten.

Über die gesamte Messzeit wurden mit den eingesetzten Schallpegelmessgeräten (Näheres siehe Anhang A4) jeweils sowohl Terz- als auch Oktavbandspektren im Frequenzbereich von 6,3 Hz bis 10 kHz gebildet und gespeichert. Aus aufgezeichneten Audiodateien wurden mittels digitalen Filtern Terz- und Oktavspektren im Bereich von 1 Hz bis 10 kHz sowie Schmalbandspektren im Bereich von 0,8 Hz bis 10 kHz gebildet. Zeiten mit Fremdgeräuschen wurden während der Messungen markiert und

bei den Auswertungen nicht verwendet. Die Mikrofone wurden jeweils auf einer schallharten Platte am Boden montiert und mit einem primären und sekundären Windschirm versehen (siehe **Abbildung 4.3-1**), um die am Mikrofon induzierten Windgeräusche zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Durch die Verwendung der schallharten Platte kommt es zu einer Schalldruckverdopplung am Mikrofon, was zu höheren Messwerten führt. Bei der Bestimmung des Schallleistungspegels muss daher anschließend eine Korrektur um -6 dB vorgenommen werden. Die Korrektur wurde in diesem Bericht bei der Darstellung von Messwerten nur dann ausgeführt, wenn es zu einem Vergleich von Ergebnissen kam, die mit unterschiedlichen Messanordnungen entstanden sind (vgl. **Abbildungen 2-3 bis 2-5** sowie **Tabelle 2-1**) oder bei Vergleichen mit der Wahrnehmungsschwelle wie z. B. in **Abbildung 4.2-5**.

Für einige Darstellungen der Messergebnisse wurde als Vergleich die menschliche Wahrnehmungsschwelle in die Grafiken eingefügt. Wir verwenden dabei die Werte der DIN 45680 (Entwurf 2013) [5]. Diese Werte liegen etwas niedriger als jene der aktuell gültigen, nach TA Lärm [10] anzuwendenden DIN 45680 (1997) [4]. Unterhalb von 8 Hz wurden die Werte des Normenwerks um Angaben aus der Literatur ergänzt [11], siehe **Tabelle A3-1**. Zur Problematik der Hör- und Wahrnehmungsschwelle sind im Anhang A1 weitere Informationen zusammengestellt. Dort findet sich auch ein grafischer Vergleich der Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle (**Abbildung A1-2**).

An der Windenergieanlage 5 wurden zusätzlich zu den Schallpegelmessungen auch Erschütterungsmessungen am Fundament sowie in den Entfernungen 32 m, 64 m und 285 m durchgeführt (siehe Kapitel 4.8).

## 4.2 Geräusche Windenergieanlage 1: REpower MM92 – 2,0 MW

### RAHMENBEDINGUNGEN

Bei der Windenergieanlage 1 (WEA 1) handelt es sich um eine Anlage der Firma REpower vom Typ MM92/100 (**Abbildung 4-1**) mit einer Nennleistung des Generators von 2,05 MW bei einer Windgeschwindigkeit von 12,5 m/s in Nabenhöhe. Der Rotordurchmesser beträgt 92 m, die





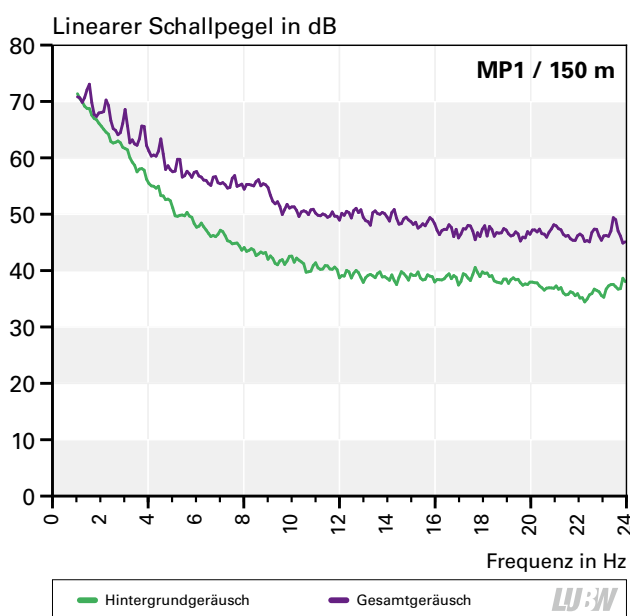
**Abbildung 4.2-1:** Windmessmast mit Blick in Richtung der zu messenden Windenergieanlage. Foto: Fa. Wölfel

Nabenhöhe über Grund 100 m. Die unmittelbare Umgebung der Anlage besteht aus landwirtschaftlich genutzten Flächen mit einzelnen eingestreuten Bäumen. Daran schließen sich Flächen mit Nadelbaumaufzucht und Wald an. In der weiteren Nachbarschaft der zu messenden Anlage stehen weitere Windenergieanlagen. Diese wurden

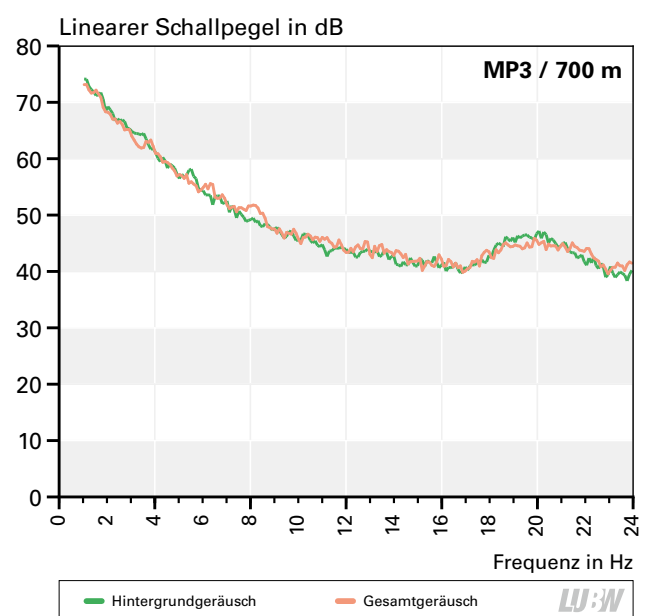
während des Messzeitraums abgeschaltet. Ein in unmittelbarer Nähe befindlicher Weg ist nur für landwirtschaftlichen Verkehr freigegeben und wird wenig befahren. Die Messungen erfolgten am 11.04.2013 zwischen 8 Uhr und 16 Uhr. Die Position des Mikrofons am Messpunkt MP1 lag in 150 m Abstand zur Anlage in Mitwindrichtung. Dadurch sollte der ungünstigste Fall berücksichtigt werden (Begünstigung der Schallausbreitung durch den Wind). Weitere Messpunkte MP2 und MP3 lagen in Abständen von 300 und 700 m in Mitwindrichtung. Einen Eindruck vermittelt **Abbildung 4.2-1**. Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 5 bis 14 m/s, einem Temperaturbereich von 10 bis 12 °C und einem Luftdruckbereich von 946 bis 951 hPa; dabei wurde der gesamte Leistungsbereich der Anlage bis zur Nennleistung abgedeckt. Die Turbulenzintensität, die im Grunde ein Maß für die Böigkeit des Windes darstellt (siehe Anhang A3) betrug 18 %.

#### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In der **Abbildung 4.2-2** sind die Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 150 m Entfernung mit einer Auflösung von 0,1 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 6,5 m/s. Bei eingeschalteter Anlage sind im Infraschallbereich zwischen 1 Hz und 5,5 Hz insgesamt sechs diskrete Maxima deutlich zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Infraschall, den der Rotor infolge seiner Bewegung erzeugt. Die gemessene

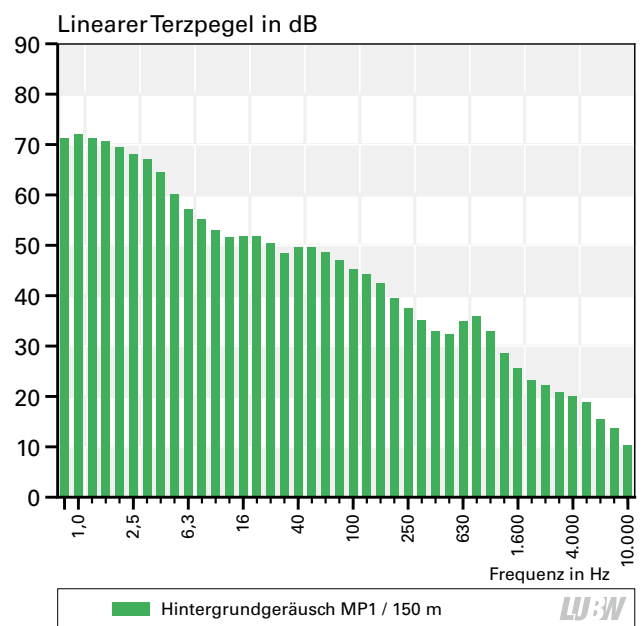
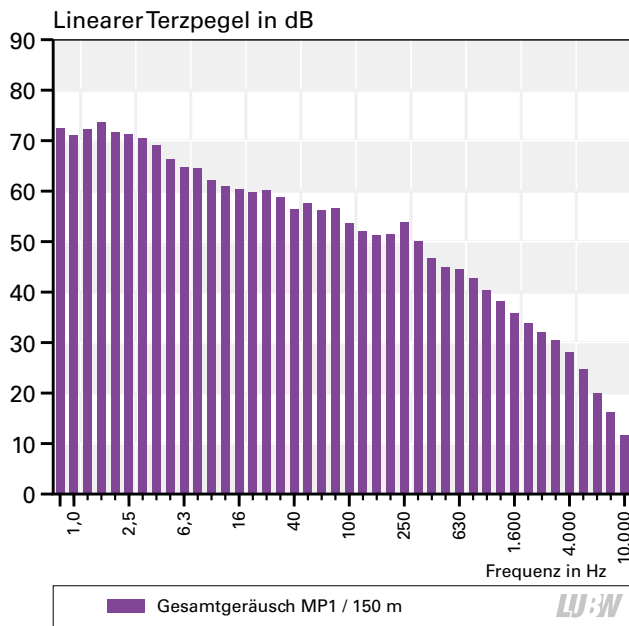


**Abbildung 4.2-2:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 1 für den Frequenzbereich des Infraschalls



**Abbildung 4.2-3:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Fernbereich der Windenergieanlage WEA 1 für den Frequenzbereich des Infraschalls





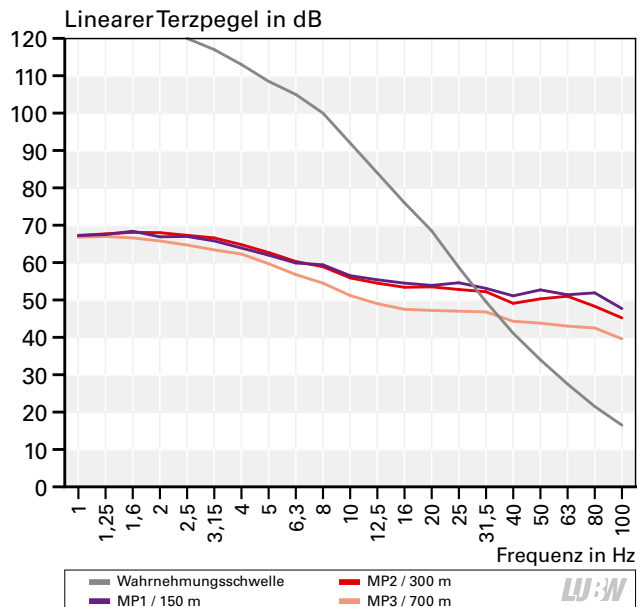
**Abbildung 4.2-4:** Terzspektren von Gesamtgeräusch und Hintergrundgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 1

nen Frequenzen entsprechen der Durchgangsfrequenz eines Rotorblattes von etwa 0,75 Hz, was mit einer Drehfrequenz des Rotors von 15 U/min korrespondiert, und den harmonischen Obertönen bei 1,5 Hz, 2,2 Hz, 3,0 Hz, 3,7 Hz, 4,5 Hz und 5,2 Hz (**Abbildung 4.2-2**). Weitere Maxima wurden bei 25 Hz und 50 Hz gemessen, diese liegen auf einem deutlich geringeren Niveau und sind auf den Betrieb des Generators zurückzuführen. Die Pegelspitzen verschwinden mit dem Abschalten der Anlage.

In der **Abbildung 4.2-3** sind die Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP3 in 700 m Entfernung dargestellt. In dieser Entfernung sind bei eingeschalteter Anlage keine diskreten Infraschallmaxima mehr auszumachen. Zwischen den Zuständen „Anlage ein“ und „Anlage aus“ gab es bei dieser Messung in 700 m Entfernung keinen messbaren Unterschied beim Infraschall. Dieser wurde hier offenbar nur von den Geräuschen des Windes und der Umgebung erzeugt. Die Windgeschwindigkeit betrug hier ebenfalls 6,5 m/s.

#### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

In **Abbildung 4.2-4** sind die Terzspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 (150 m) für den Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 6,5 m/s. Die Pegelreduktion durch das Abschalten der Anlage ist hier in einem deutlich breiteren Spektralbereich erkennbar.



**Abbildung 4.2-5:** Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1 (150 m), MP2 (300 m) und MP3 (700 m) der WEA 1, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.

#### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

In **Abbildung 4.2-5** sind die Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1, MP2 und MP3 für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz zusammen mit der Wahrnehmungsschwelle im Vergleich dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 6,8 m/s. Zu beachten ist, dass jeweils auch die Hintergrundgeräusche von Wind und Vegetation enthalten sind; diese können am jeweiligen Messort unterschiedlich sein. Erkennbar ist, dass ab etwa

6-8 Hz das Gesamtgeräusch mit größerem Abstand zur Anlage abnimmt. Die Unterschiede werden hierbei mit steigender Frequenz deutlicher. Dies entspricht im Hörschall einem hörbaren Effekt. Beim Messpunkt in 700 m Entfernung ist die Anlage nicht mehr ständig und allenfalls schwach wahrnehmbar; die Kurve entspricht nahezu dem Hintergrundgeräusch. Im Infraschallbereich liegen die Kurven deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

#### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Die oben dargestellten Diagramme spiegeln konkrete Einzelsituationen bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit (6,5 bzw. 6,8 m/s) exemplarisch wider. Dargestellt wurden die Ergebnisse dabei jedoch bei unterschiedlichen Frequenzen. Es stellt sich dabei natürlich die Frage, wie die Verhältnisse bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten sind. Auch dies wurde gemessen, die Ergebnisse sind in der **Abbildung 4.2-6** dargestellt. Diese Abbildung ist nicht auf Anhieb leicht verständlich und soll daher Schritt für Schritt erläutert werden.

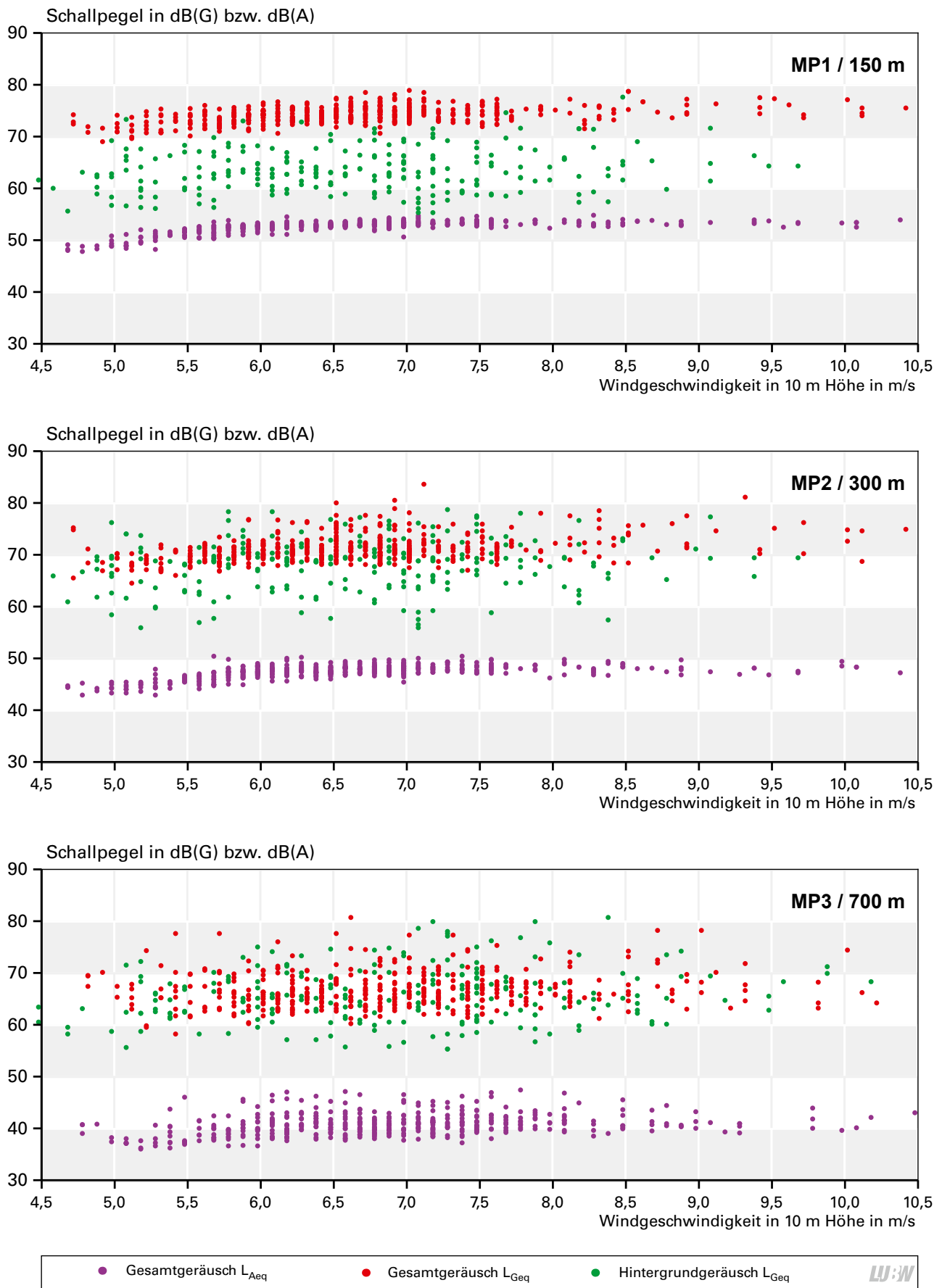
Die drei Schaubilder stellen die Verhältnisse an den jeweiligen Messpunkten in den Entfernungen 150 m (obere Abbildung), 300 m (mittlere Abbildung) und 700 m (untere Abbildung) dar. Auf der unteren, horizontalen Achse ist jeweils diese Windgeschwindigkeit von 4,5 bis 10,5 m/s aufgetragen. Die senkrechte Achse stellt Schallpegelwerte dar. Jeder Punkt entspricht einer einzelnen Messsequenz von 10 Sekunden bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit. Die violetten Punkte, die jeweils den unteren Wertebereich bilden, stellen den Hörschall bei laufender Anlage dar, angegeben in dB(A). Gut erkennbar ist bei Abständen von 150 und 300 m, dass der Hörschall bei Windgeschwindigkeiten von 4,5 m/s bis etwas oberhalb von 5,5 m/s leicht ansteigt, dann aber, bei höheren Windgeschwindigkeiten konstant bleibt. Wie verhält sich dies bei tieffrequentem Schall bzw. Infraschall? Hierzu wurde die Abhängigkeit des G-bewerteten Schallpegels, angegeben als dB(G), untersucht.

Die roten Punkte stellen den G-bewerteten Schallpegel bei eingeschalteter Anlage dar, die grünen Punkte bei ausgeschalteter Anlage. Im Nahbereich der Anlage, in 150 m Entfernung (oberes Bild) sieht man deutlich, dass bei eingeschalteter Anlage auch im tieffrequenten Bereich (inkl. Infraschall) eine ähnliche Abhängigkeit des Schallpegels von der Windgeschwindigkeit besteht wie beim Hörschall. Außerdem ist gut erkennbar, dass ein deutlicher Unterschied zwischen eingeschalteter und ausgeschalteter Anlage besteht. Die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) liegen deutlich höher als bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte). In 300 m Entfernung (mittleres Bild) ist dieser Unterschied schon geringer ausgeprägt, bei 700 m ist er nicht mehr erkennbar. Zwischen der roten Punktwolke (Anlage ein) und der grünen Punktwolke (Anlage aus) besteht praktisch kein Unterschied mehr, unabhängig von der Windgeschwindigkeit.

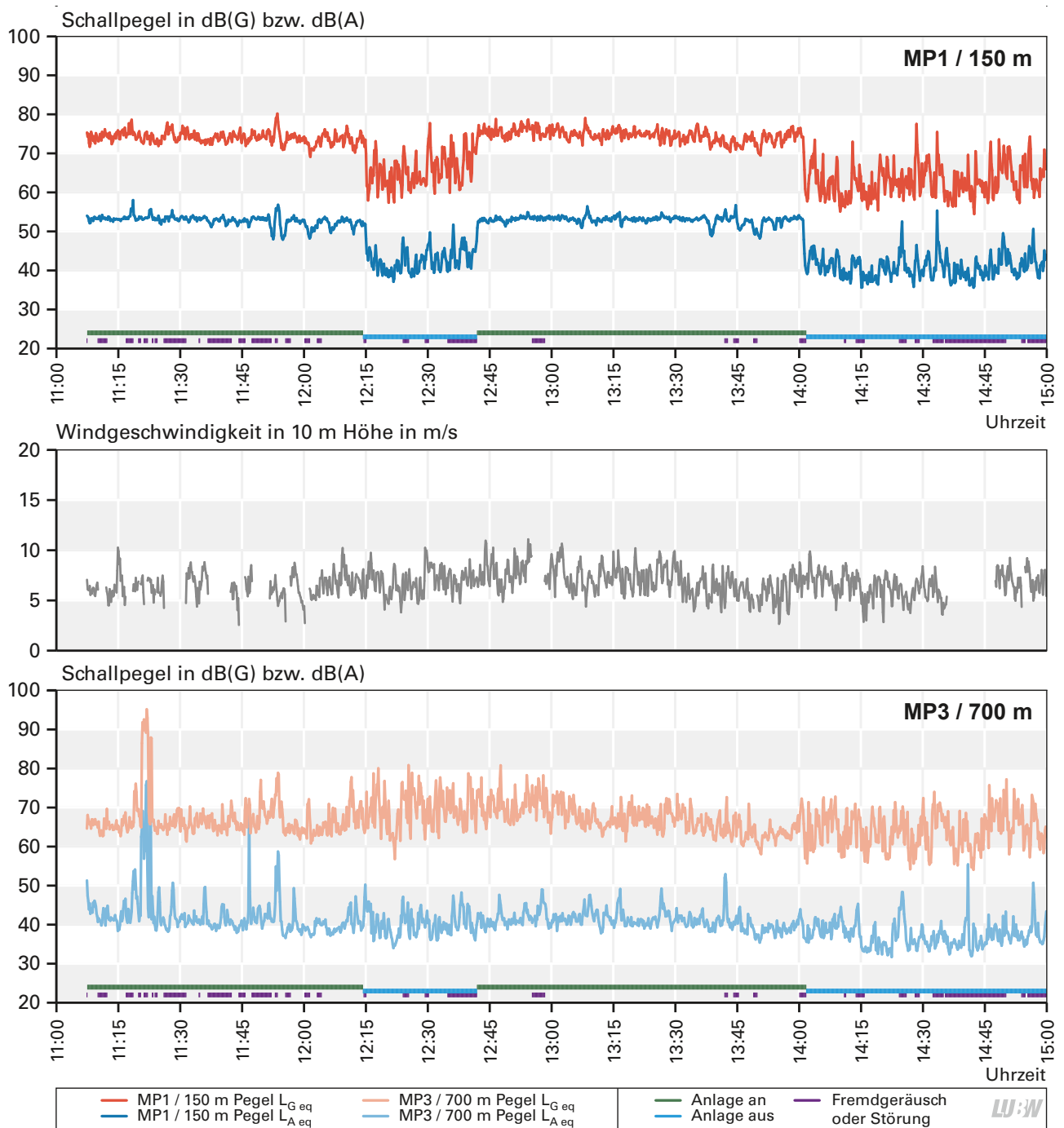
An den Messwerten wird außerdem deutlich, dass das Hintergrundgeräusch durch Wind und Vegetation, gemessen bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punktwolke) stark streut, also auffälligen, natürlichen Schwankungen unterliegt. Die Werte spannen einen Bereich von bis zu 20 dB(G) auf. Die gemessenen Sequenzen der Anlagengeräusche streuen hingegen, zumindest im Nahfeld, deutlich weniger.

#### PEGELVERLAUF WÄHREND DER MESSUNG

Die **Abbildung 4.2-7** zeigt die A- und G-bewerteten Pegelverläufe zwischen 11 Uhr und 15 Uhr in 150 m und 700 m Abstand. Zusätzlich sind die Betriebszustände der WEA (grün = Anlage an, hellblau = Anlage aus) sowie Zeiträume mit Fremdgeräuschen (violett) dargestellt. Bei den beiden Pegelverläufen des Messpunktes MP1 ist die Betriebsphase „Anlage aus“ durch die deutlich abfallenden Pegelverläufe erkennbar. Am Messpunkt MP3 ist ein Pegelabfall bei abgeschalteter Anlage auf Grund des schwankenden Hintergrundgeräusches kaum erkennbar – lediglich die Minima des A-Pegelverlaufes sind etwas niedriger als bei laufender Anlage. Der G-Pegelverlauf hingegen deckt bei abgeschalteter Anlage fast den gleichen Wertebereich ab.



**Abbildung 4.2-6:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage WEA 1. Dargestellt sind die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) und bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte) sowie die A-Pegel bei eingeschalteter Anlage (violette Punkte).



**Abbildung 4.2-7:** Zeitlicher Verlauf des Hörschallpegels (A-Pegel), des Infraschallpegels (G-Pegel) sowie der Windgeschwindigkeit während der Messungen an der Windenergieanlage WEA 1

### 4.3 Geräusche Windenergieanlage 2: Enercon E-66 – 1,8 MW

#### RAHMENBEDINGUNGEN

Bei der Windenergieanlage 2 (WEA 2) handelt es sich um eine getriebelose Anlage der Fa. Enercon, Typ E-66 18/70 (**Abbildung 4-2**) mit einer Nennleistung des Generators von 1,8 MW. Der Rotordurchmesser beträgt 70 m, die Nabenhöhe über Grund 86 m. Die unmittelbare Umgebung der Anlage besteht aus landwirtschaftlich genutzten Flächen, daran angrenzend teilweise Wald. In der Nachbarschaft stehen weitere Windenergieanlagen. Diese wurden während des Messzeitraumes komplett abgeschaltet, um Fremdgeräusche zu verhindern. In ca. 1,5 km Entfernung befand sich eine weitere Windenergieanlage; diese war während der Messdauer in Betrieb. Ein in unmittelbarer Nähe befindlicher Weg ist nur für den landwirtschaftlichen Verkehr freigegeben und sehr wenig befahren. Die Messungen erfolgten am 02.11.2013 zwischen 10 Uhr und 18 Uhr. Die Position des Mikrofons am Messpunkt MP1 lag in 120 m Abstand zur Anlage, Messpunkt MP2 in 240 m, jeweils in Mitwindrichtung (um die Begünstigung der Schallausbreitung durch den Wind zu berücksichtigen). Das Mikrophon am Messpunkt MP3 wurde in 300 m Abstand



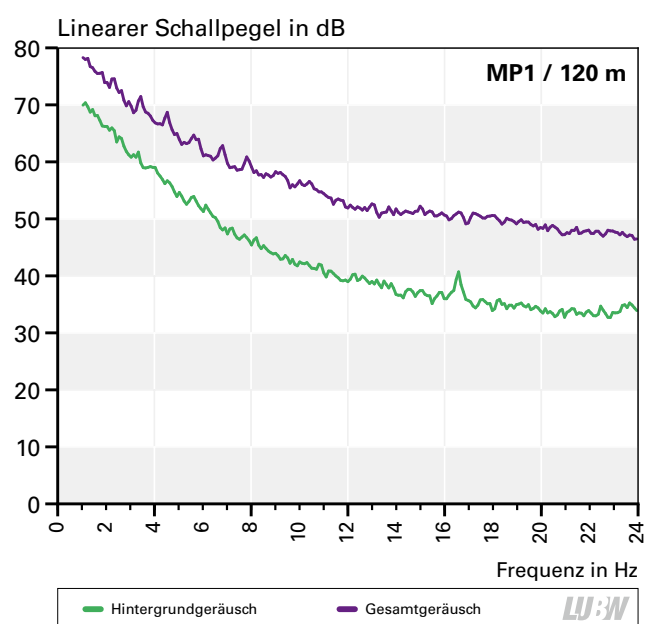
**Abbildung 4.3-1:** Messpunkt MP1 mit Mikrophon, schallharter Platte und doppeltem Windschirm. Im Hintergrund die 120 m entfernte Windenergieanlage WEA 2. Foto: Fa. Wölfel.

von der Turmachse und um 30° abweichend von der Hauptwindrichtung positioniert. Ein Messpunkt in 700 m Entfernung ließ sich vor Ort nicht realisieren. Einen Eindruck vermittelt **Abbildung 4.3-1**.

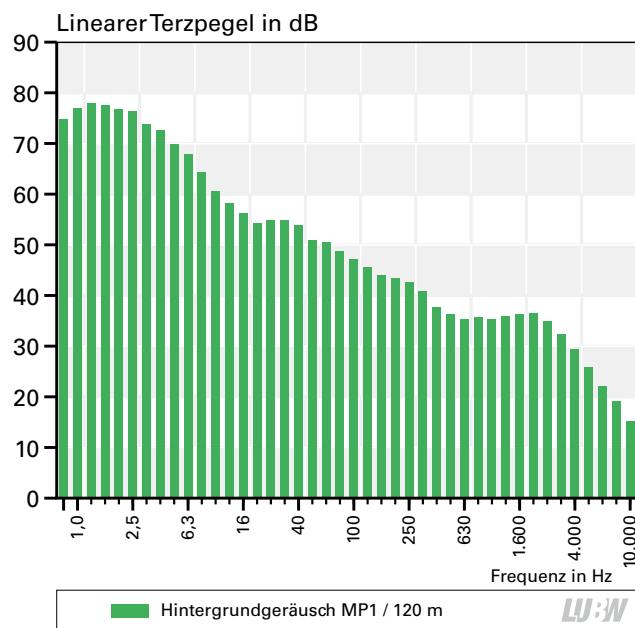
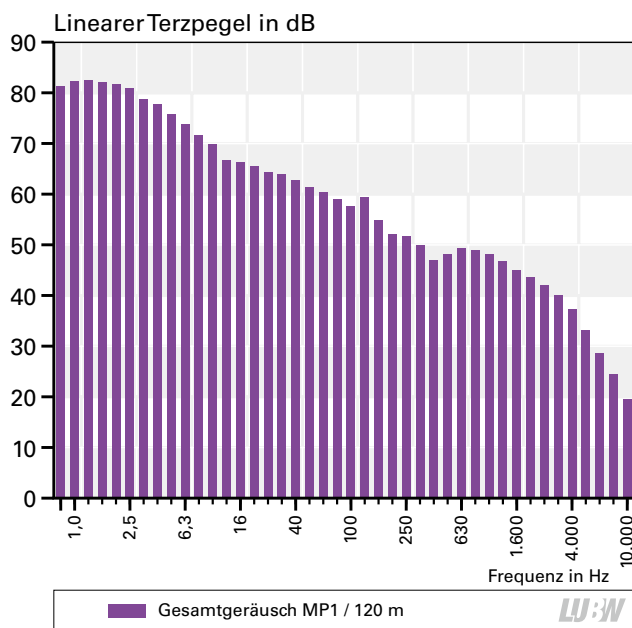
Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 5 bis 15 m/s (gemessen in 10 m Höhe), einem Temperaturbereich von 11 bis 12,5 °C, einem Luftdruckbereich von 926 bis 927 hPa und in einem Leistungsbereich von 0 bis 1 800 kW. Die Turbulenzintensität (siehe Anhang A3) betrug während der Messung 28 % und war somit relativ hoch.

#### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In der **Abbildung 4.3-2** sind die Schmalbandspektren von Hintergrund- und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 120 m Entfernung mit einer Auflösung von 0,1 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 9 m/s. Bei eingeschalteter Anlage sind im Infraschallbereich unterhalb 8 Hz mehrere diskrete Maxima zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Infraschall, den der Rotor infolge seiner Bewegung erzeugt. Die gemessenen Frequenzen entsprechen der Durchgangsfrequenz eines Rotorblattes und seinen harmonischen Obertönen. Bei 22,5 Umdrehungen pro Minute, welche die Anlage ausführte, kann man rechnerisch die Pegelspitzen bei 2,2 Hz, 3,4 Hz, 4,5 Hz, 5,6 Hz,



**Abbildung 4.3-2** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 2 für den Frequenzbereich des Infraschalls



**Abbildung 4.3-3:** Terzspektren von Gesamtgeräusch und Hintergrundgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 2

6,8 Hz und 7,9 Hz in guter Übereinstimmung ermitteln. Sie verschwinden mit dem Abschalten der Anlage; in 300 m Entfernung treten sie nur noch schwach auf (nicht dargestellt). Das im Hintergrund deutlich sichtbare Pegelmaximum bei ca. 17 Hz ist vermutlich fremdgeräuschbedingt.

#### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

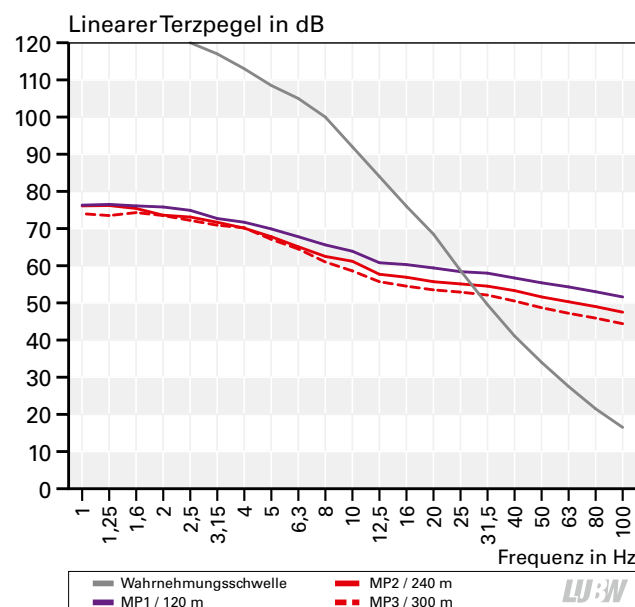
In der **Abbildung 4.3-3** sind die Terzspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 120 m Entfernung für den Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 9 m/s. Die Pegelreduktion durch das Abschalten der Anlage ist hier in einem deutlich breiteren Spektralbereich erkennbar.

#### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

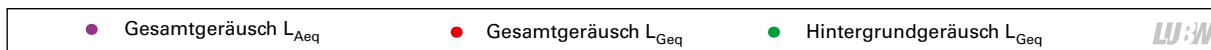
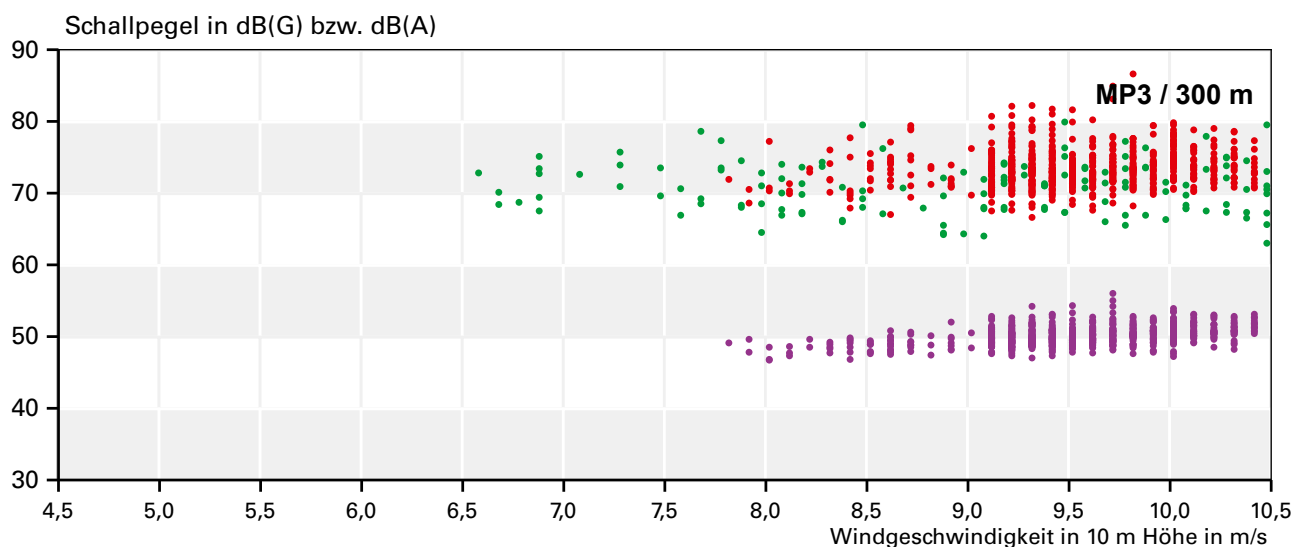
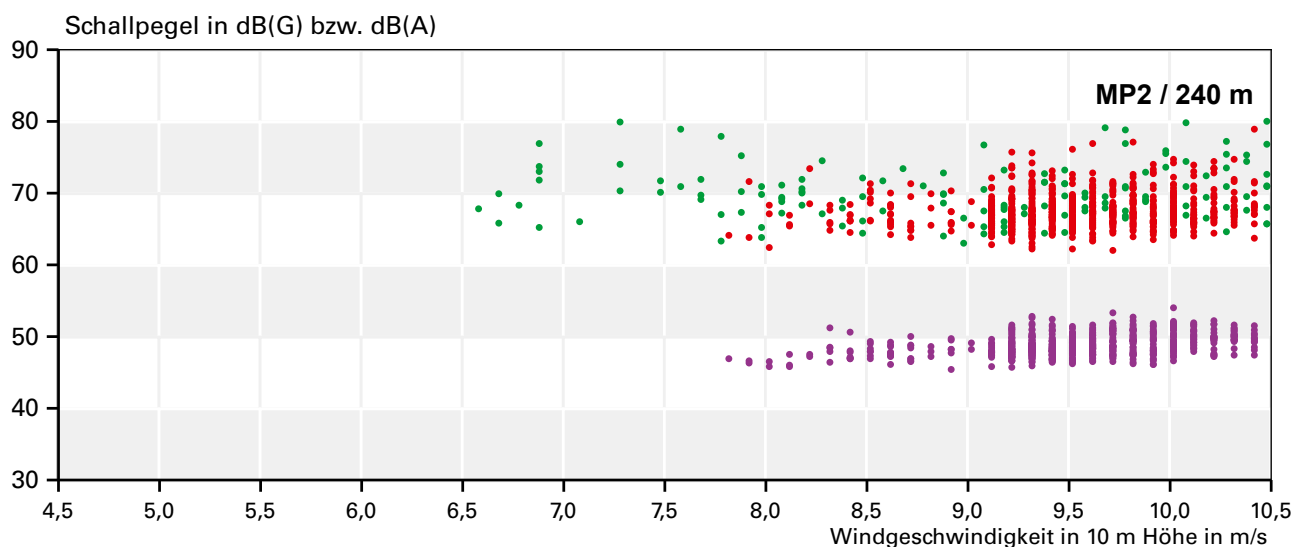
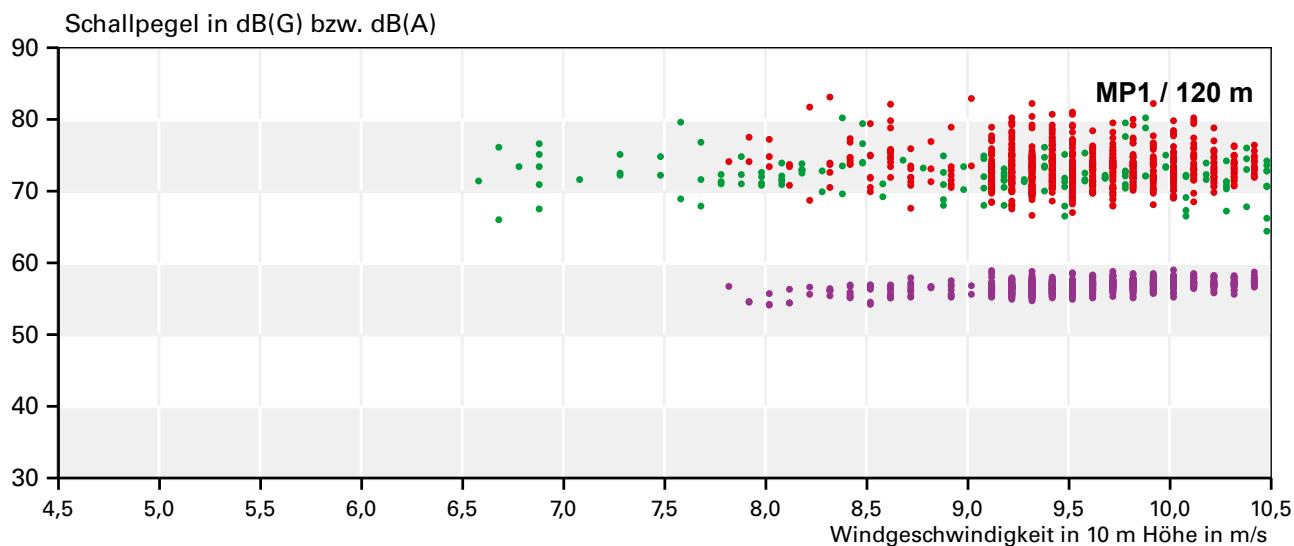
**Abbildung 4.3-4** zeigt die Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1, MP2 und MP3 für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz zusammen mit der Wahrnehmungsschwelle im Vergleich. Die Windgeschwindigkeit betrug 9 m/s. Die Hintergrundgeräusche von Wind und Vegetation sind enthalten; diese können am jeweiligen Messort unterschiedlich sein. Die Messpunkte MP2 und MP3 sind von der Anlage weiter entfernt als Messpunkt MP1 (240 m bzw. 300 m gegenüber 120 m). Man misst dort auch etwas niedrigere Werte, was mit steigender Frequenz deutlicher wird. Im Bereich des Infraschalls liegen die Kurven deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

#### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der tieffrequenten Emissionen von der Windgeschwindigkeit wurden zahlreiche Messwerte erfasst und in **Abbildung 4.3-5** dargestellt. Die drei Schaubilder stellen die Verhältnisse in den Entfernungen 120 m (MP1, obere Abbildung), 240 m (MP2, mittlere Abbildung) und 300 m bei seitlicher Versetzung um 30° zur Windrichtung (MP3, untere Abbildung) dar. Die violetten Punkte im unteren Wertebereich stellen den Hörschall dar, angegeben in dB(A). Im oberen Bild ist gut



**Abbildung 4.3-4:** Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1 (120 m), MP2 (240 m) und MP3 (300 m) der WEA 2, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.



**Abbildung 4.3-5:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage WEA 2. Dargestellt sind die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) und bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte) sowie die A-Pegel bei eingeschalteter Anlage (violette Punkte).

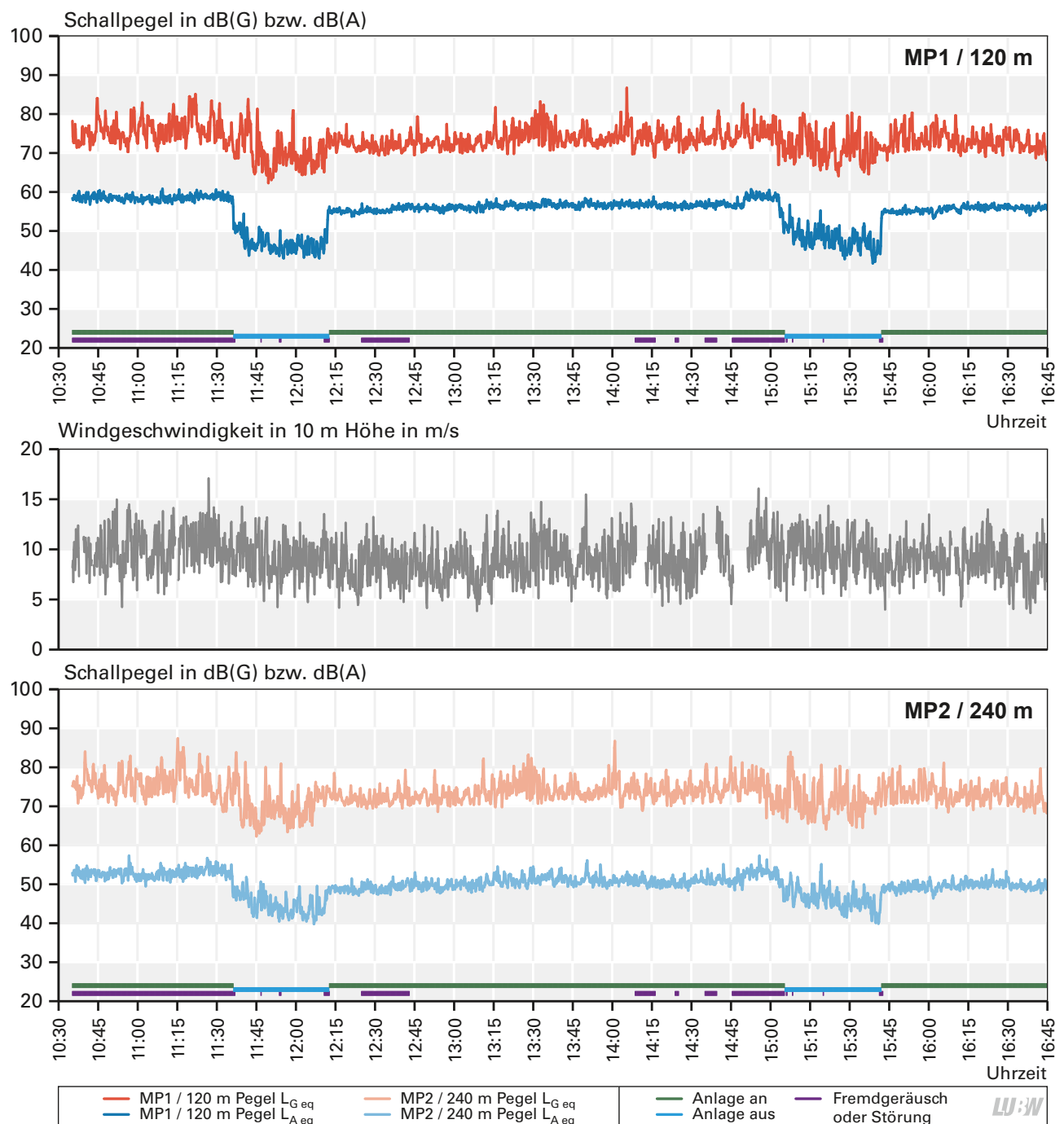


erkennbar, dass in 120 m Abstand die gemessenen A-Pegel höher liegen als an den Messpunkten in 240 m bzw. 300 m Entfernung zur Anlage. Die Anlage war in 120 m lauter wahrnehmbar als in 240 m.

Die roten Punkte stellen den G-bewerteten Schallpegel bei eingeschalteter Anlage dar, die grünen Punkte bei ausgeschalteter Anlage. Das obere Bild zeigt, dass am Messpunkt MP1, also im Nahfeld bei 120 m Entfernung zur Anlage, der G-bewertete Schalldruckpegel bei Betrieb der Wind-

energieanlage in etwa konstant und minimal höher ist als der des Hintergrundgeräuschs bei ausgeschalteter Anlage. Ähnlich verhält es sich auch an den Messpunkten MP2 und MP3. Es sind kaum Unterschiede zwischen den Messwerten erkennbar, die roten und grünen Punktwolken überdecken sich weitgehend.

Die relativ große Streuung der Messwerte sowohl bei eingeschalteter Anlage und der relativ hohe G-bewertete Schalldruckpegel – auch bei ausgeschalteter



**Abbildung 4.3-6:** Zeitlicher Verlauf des Hörschallpegels (A-Pegel), des Infraschallpegels (G-Pegel) sowie der Windgeschwindigkeit während der Messungen an der Windenergieanlage WEA 2



Anlage – sind hier wohl auf die durchgehend herrschenden hohen Windgeschwindigkeiten zurückzuführen. Die Messungen mit eingeschalteter Anlage erfolgten im Bereich von 8 bis 11,5 m/s (in 10 m Höhe). Ein Teil des Effektes ist hierbei möglicherweise auch dem windinduzierten Schall an den Mikrofonen zuzuschreiben.

#### PEGELVERLAUF WÄHREND DER MESSUNG

Die **Abbildung 4.3-6** zeigt die A- und G-bewerteten Pegelverläufe zwischen 10:30 Uhr und 17 Uhr in 120 m und 240 m Abstand. Zusätzlich sind die Betriebszustände der WEA (grün = Anlage an, hellblau = Anlage aus) sowie Zeiträume mit Fremdgeräuschen (violett) dargestellt. Bei den beiden Pegelverläufen des Messpunkts MP1 ist die Betriebsphase „Anlage aus“ durch die deutlich abfallenden Pegelverläufe erkennbar. Am Messpunkt MP2 ist der Pegelabfall bei abgeschalteter Anlage schwächer ausgeprägt, aber ebenfalls noch klar erkennbar.



**Abbildung 4.4-1:** Windenergieanlage WEA 3 mit landwirtschaftlich genutztem Umfeld. Im Vordergrund erkennbar der Messpunkt mit schallharter Platte und doppeltem Windschirm. Foto: Fa. Wölfel

### 4.4 Geräusche Windenergieanlage 3: Enercon E-82 – 2,0 MW

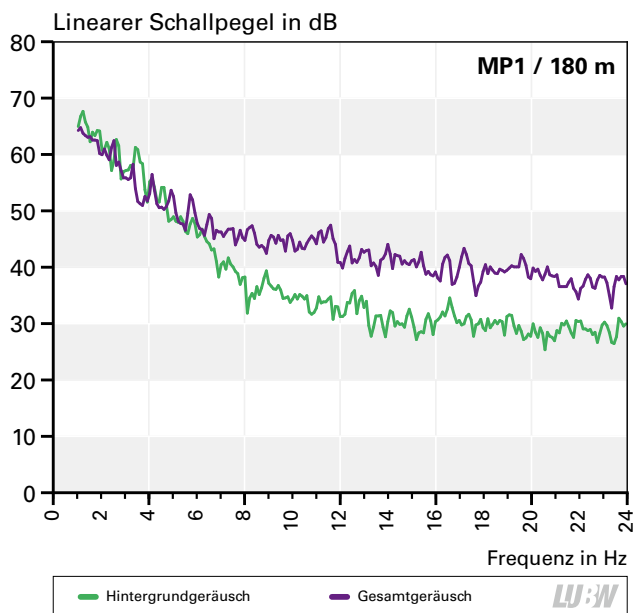
#### RAHMENBEDINGUNGEN

Bei der Windenergieanlage 3 (WEA 3) handelt es sich um eine getriebelose Anlage der Fa. Enercon, Typ E-82 E2 (**Abbildung 4-3**) mit einer Nennleistung des Generators von 2,0 MW. Der Rotordurchmesser beträgt 82 m, die Nabenhöhe über Grund 138 m. Wie in **Abbildung 4.4-1** erkennbar, befinden sich in näherer Umgebung landwirtschaftlich genutzte Flächen. Rund 400 m entfernt grenzt ein Waldstück an. In unmittelbarer Umgebung zur Anlage verläuft ein sehr wenig befahrener Feldweg, der nur von land- und forstwirtschaftlichem Verkehr genutzt wird. In ca. 450 m Entfernung zur Anlage befindet sich eine Straße. Während der Messung waren keine Verkehrsgeräusche wahrnehmbar. In einer Entfernung von 1 500 m befinden sich weitere Windenergieanlagen anderer Betreiber. Diese entfernt gelegenen Anlagen waren während der Messdauer in Betrieb. Die Immissionen waren während der Hintergrundgeräuschemessungen subjektiv nicht wahrnehmbar. Die nächste Wohnbebauung befindet sich mehr als 1 000 m entfernt. Die Messung wurde am 15.10.2013 zwischen 10:30 Uhr und 15 Uhr durchgeführt. Das Mikrofon am Messpunkt MP1 war 180 m in Mitwindrichtung von der Turmachse entfernt, am Messpunkt MP2 waren es 300 m in Mitwindrichtung. Das Mikrofon am Messpunkt MP3 wurde ebenfalls in einer Entfernung von 300 m, jedoch im Winkel von 90° zur Mitwindrichtung positioniert. Ein Messpunkt in 700 m Entfernung war aufgrund der örtlichen Verhältnisse nicht realisierbar.

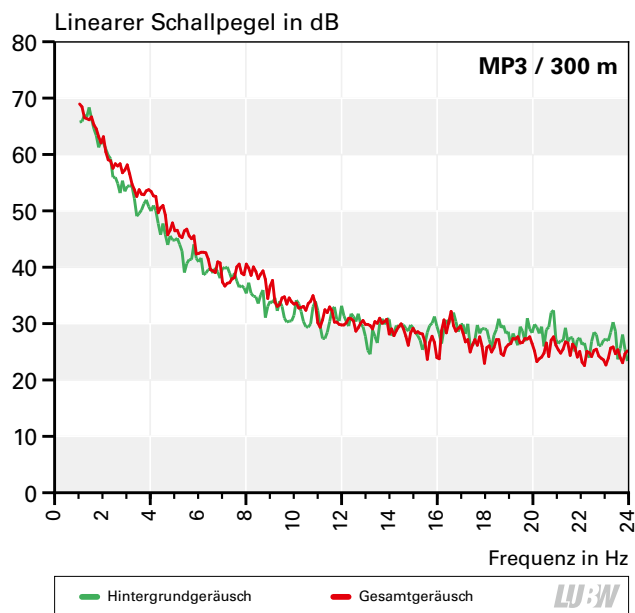
Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 2 bis 12 m/s (gemessen in 10 m Höhe), einem Temperaturbereich von 9 bis 13 °C, einem Luftdruckbereich von 931 bis 934 hPa und in einem Leistungsbereich von 0 bis 2 070 kW. Die Turbulenzintensität (siehe Anhang A3) betrug während der Messung 25 % und war somit relativ hoch.

#### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In der **Abbildung 4.4-2** sind die Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 180 m Entfernung mit einer Auflösung von 0,1 Hz dargestellt. Bei eingeschalteter Anlage sind im Infraschall-



**Abbildung 4.4-2:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 3 für den Frequenzbereich des Infraschalls

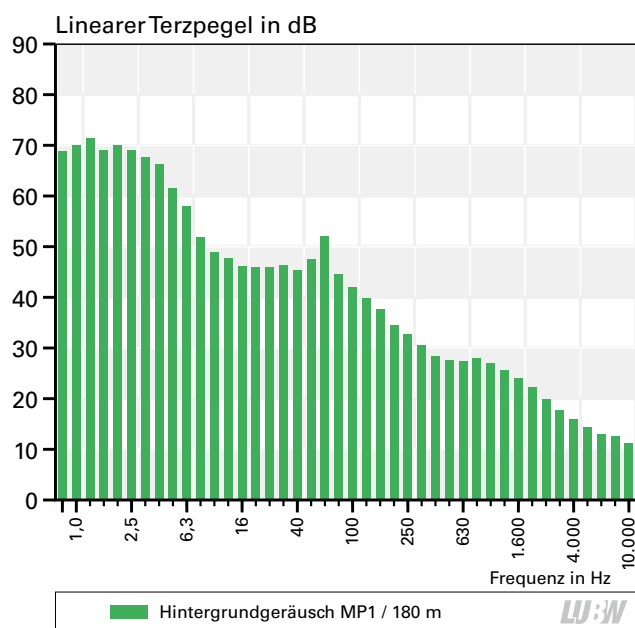
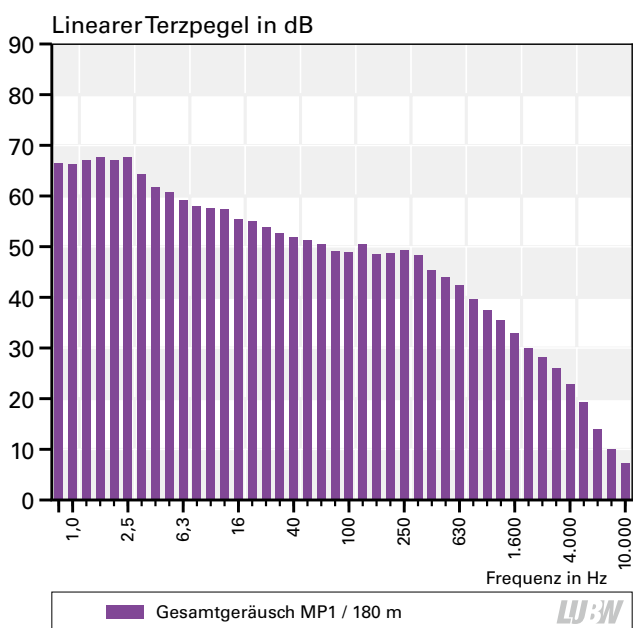


**Abbildung 4.4-3:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Fernbereich der Windenergieanlage WEA 3 für den Frequenzbereich des Infraschalls

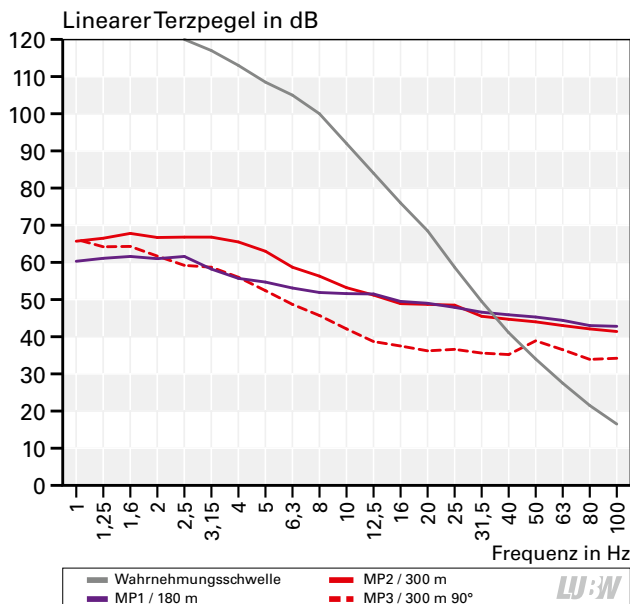
bereich unterhalb 8 Hz mehrere diskrete Maxima deutlich zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Infraschall, den der Rotor infolge seiner Bewegung erzeugt. Die gemessenen Frequenzen entsprechen der Durchgangsfrequenz eines Rotorblattes (hier ca. 0,83 Hz) und den zugehörigen harmonischen Oberschwingungen (2,5 Hz, 3,3 Hz, 4,1 Hz, 5 Hz, 5,8 Hz). Die Pegelspitzen verschwinden mit dem Abschalten der Anlage. In 300 m Entfernung treten sie nur noch schwach auf (**Abbildung 4.4-3**). Die Windgeschwindigkeit betrug bei beiden Messungen 6 m/s.

#### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

In der **Abbildung 4.4-4** sind die Terzspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 180 m Entfernung für den Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 6 m/s. Die Pegelreduktion durch das Abschalten der Anlage ist hier in einem deutlich breiteren Spektralbereich erkennbar.



**Abbildung 4.4-4:** Terzspektren von Gesamtgeräusch und Hintergrundgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 3



**Abbildung 4.4-5:** Terzspektren des Gesamtgeräusches an den Messpunkten MP1 (180 m), MP2 (300 m) und MP3 (300 m, um 90° versetzt) der WEA 3, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.

#### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

In der **Abbildung 4.4-5** sind die Terzspektren des Gesamtgeräusches an den Messpunkten MP1, MP2 und MP3 für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz zusammen mit der Wahrnehmungsschwelle im Vergleich dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 9 m/s. Zu beachten ist, dass jeweils auch die Hintergrundgeräusche von Wind und Vegetation enthalten sind; diese können am jeweiligen Messort unterschiedlich sein. Die Messpunkte MP2 und MP3 sind von der Anlage weiter entfernt als MP1 (300 m gegenüber 180 m). Messpunkt MP3 ist um 90° aus der Mitwindrichtung versetzt, man misst dort dann auch etwas niedrigere Werte als am gleich weit entfernten Messpunkt MP2. Der Messpunkt MP2 liegt außerdem näher an einer in der Umgebung vorhandenen Straße als die Messpunkte MP1 und MP3, was auch ein Grund für die etwas höheren Werte sein könnte. Im Bereich des Infraschalls liegen die Kurven deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

#### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der tieffrequenten Emissionen von der Windgeschwindigkeit wurde eine Vielzahl von Messwerten erfasst und in **Abbildung 4.4-6** grafisch dargestellt. Die drei Schaubilder stellen die Verhältnisse an den jeweiligen Messpunkten in den Entfernungen 180 m (oben), 300 m (Mitte) und 300 m bei seit-

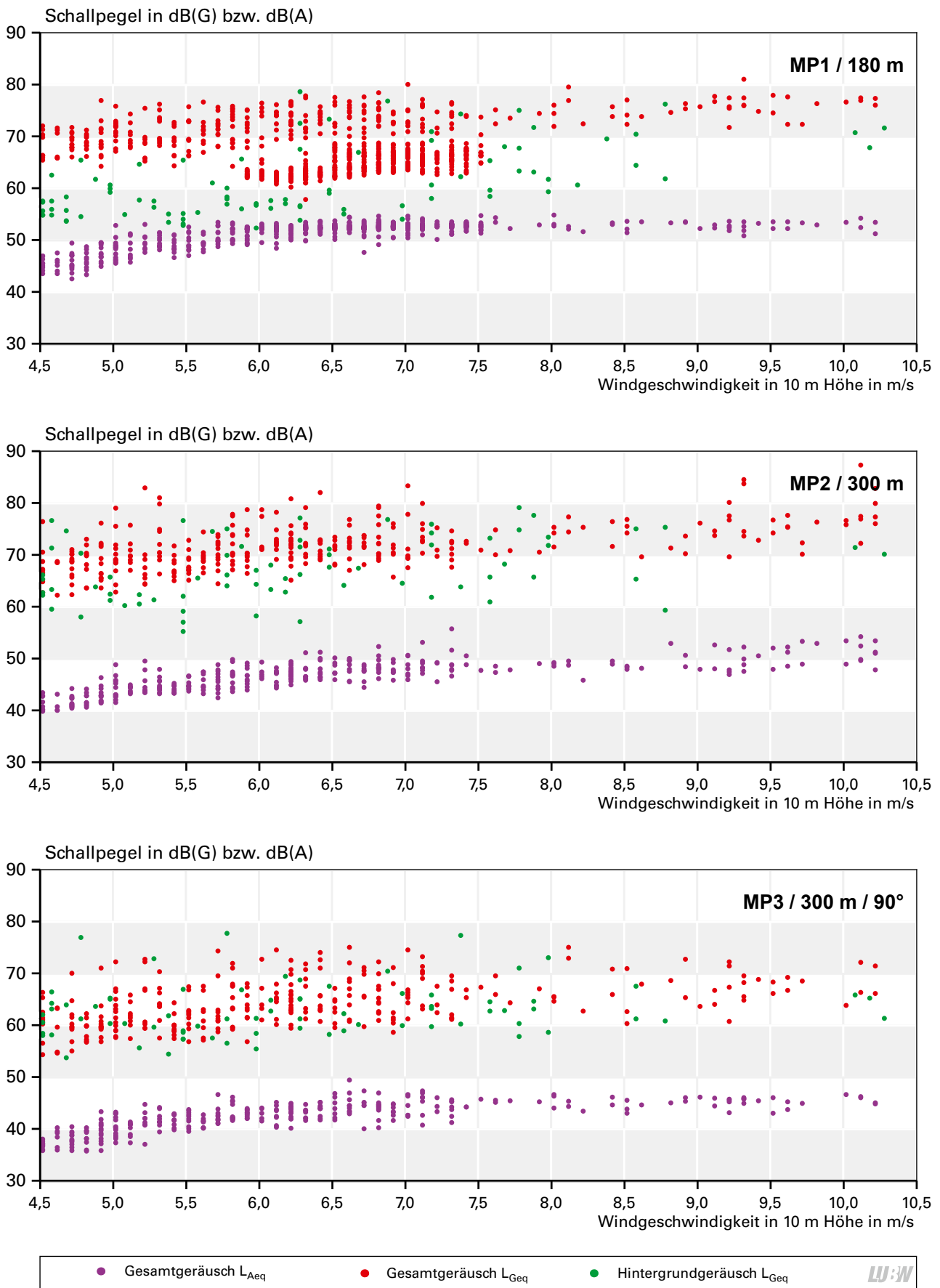
licher Versetzung um 90° zur Mitwindrichtung (unten) dar. Die violetten Punkte, die jeweils die untere Kurve bilden, stellen den Hörschall dar, angegeben in dB(A). Gut erkennbar ist, dass im Abstand 180 m (oberes Bild) die gemessenen A-Pegel höher liegen als bei den Messpunkten in 300 m Entfernung zur Anlage; dem entsprechend war die Anlage in 180 m Abstand auch deutlicher wahrnehmbar als in 300 m. Der A-Pegel steigt zunächst mit höher werdender Windgeschwindigkeit an.

Die roten Punkte stellen den G-bewerteten Schallpegel bei eingeschalteter Anlage dar, die grünen Punkte bei ausgeschalteter Anlage. Ähnlich wie beim A-Pegel erkennt man – trotz höherer Streuung – auch beim G-Pegel, dass dieser mit zunehmender Windgeschwindigkeit etwas ansteigt und dann konstant bleibt.

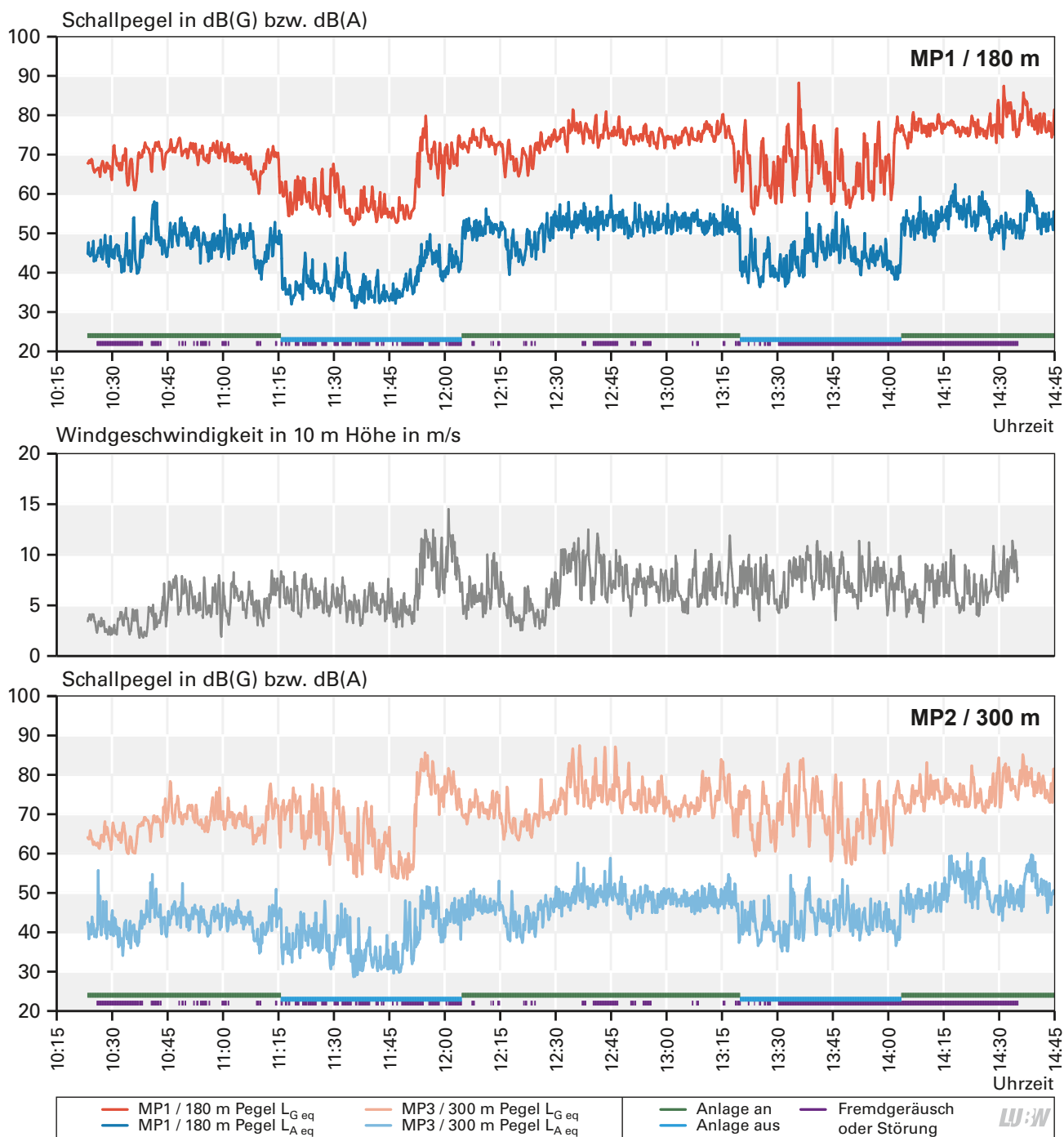
Das obere Bild zeigt, dass am MP1, also im Nahfeld bei 180 m Entfernung zur Anlage, der G-bewertete Schalldruckpegel bei Betrieb der WEA 3 merklich höher ist als der des Hintergrundgeräusches bei ausgeschalteter Anlage. Viel weniger ausgeprägt ist dies in 300 m Entfernung (mittleres Bild) und kaum mehr erkennbar in 300 m Entfernung bei 90° Versetzung zur Windrichtung (unteres Bild). Die roten und grünen Punktwolken überdecken sich dann in weiten Teilen.

#### PEGELVERLAUF WÄHREND DER MESSUNG

Die **Abbildung 4.4-7** zeigt die A- und G-bewerteten Pegelverläufe zwischen 10:15 Uhr und 14:45 Uhr für die Abstände 180 m und 300 m. Zusätzlich sind die Betriebszustände der WEA (grün = Anlage an, hellblau = Anlage aus) sowie Zeiträume mit Fremdgeräuschen (violett) dargestellt. Bei den beiden Pegelverläufen des Messpunkts MP1 ist die Betriebsphase „Anlage aus“ durch die deutlich abfallenden Pegelverläufe erkennbar. Am Messpunkt MP2 ist ein Pegelabfall bei abgeschalteter Anlage auf Grund des schwanken Hintergrundgeräusches deutlich schwächer erkennbar.



**Abbildung 4.4-6:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage WEA 3. Dargestellt sind die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) und bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte) sowie die A-Pegel bei eingeschalteter Anlage (violette Punkte).



**Abbildung 4.4-7:** Zeitlicher Verlauf des Hörschallpegels (A-Pegel), des Infraschallpegels (G-Pegel) sowie der Windgeschwindigkeit während der Messungen an der Windenergieanlage WEA 3



## 4.5 Geräusche Windenergieanlage 4: REpower 3.2M114 – 3,2 MW

### RAHMENBEDINGUNGEN

Bei der Windenergieanlage 4 (WEA 4) handelt es sich um eine Anlage der Fa. REpower, Typ 3.2M114 (**Abbildung 4-4**), mit einer Generator-Nennleistung von 3,2 MW. Der Rotordurchmesser beträgt 114 m, die Nabenhöhe 143 m.

Die gemessene Anlage ist Teil eines Windparks mit mehreren Windkraftanlagen. Die benachbarten Anlagen wurden während des Messzeitraumes komplett abgeschaltet, um Fremdgeräusche zu verhindern. Die Umgebung der Anlage besteht aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein in unmittelbarer Nähe der zu messenden Anlage befindlicher Feldweg wird nur selten von landwirtschaftlichem Verkehr genutzt. In größerer Entfernung befindet sich Wald. In Entfernungen von 0,7 km und 2 km, in entgegengesetzter Richtung zu den Messpunkten, waren weitere Windenergieanlagen in Betrieb, deren Geräusche zu keiner Zeit subjektiv wahrnehmbar waren. Die Messungen erfolgten am 20.03.2014 zwischen 10 Uhr und 21:30 Uhr. Die Position

des Mikrofons am Messpunkt MP1 lag in 180 m Abstand zur Anlage, die Messpunkte MP2 und MP3 in 300 m und Messpunkt MP4 in 650 m, jeweils in Mitwindrichtung, um den in der Regel ungünstigsten Fall zu berücksichtigen (Begünstigung der Schallausbreitung durch den Wind). Der unmittelbar neben dem Messpunkt MP2 gelegene Messpunkt MP3 diente als Vergleichsmesspunkt. Sein Mikrophon war mit einem primären Windschirm versehen und ca. 50 cm tief in einem eigens dafür ausgehobenen Loch platziert. Ein sekundärer Windschirm deckte das Loch bündig ab. An den Messpunkten MP2 und MP3 erfolgten Parallelmessungen, die einen Vergleich der Messwerte sowie Rückschlüsse auf windinduzierte Schallanteile erlauben, welche am Mikrophon entstehen. In **Abbildung 4.5-1** sind die beiden Messpunkte MP2 und MP3 und die zu messende Anlage erkennbar. Die **Abbildungen 4.5-2 bis 4.5-5** vermitteln einen Eindruck von den Verhältnissen vor Ort und der eingesetzten Messtechnik.

Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 3 bis 7 m/s (gemessen in 10 m Höhe), einem Temperaturbereich von 15 bis 19 °C, einem Luftdruckbe-



**Abbildung 4.5-1** (rechts): Messpunkte MP2 und MP3 in 300 m Entfernung von der Turmachse. Schallharte Platte und doppelter Windschirm (links), überspanntes Erdloch (rechts). Foto: Fa. Wölfel



**Abbildung 4.5-2:** Blick ins Innere der Anlage mit 143 m Nabenhöhe. Foto: LUBW



**Abbildung 4.5-3:** Schallharte Platte mit darauf montiertem Mikrophon und doppeltem Windschirm. Das eingesetzte Messgerät Typ DUO steht auf einem Stativ montiert daneben und ist über ein Messkabel mit dem Mikrophon verbunden. Foto: LUBW



**Abbildung 4.5-4:** Windmessmast zur Messung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur. Der Mast wird auf 10 m Höhe ausgefahren (hier noch nicht geschehen). Foto: LUBW



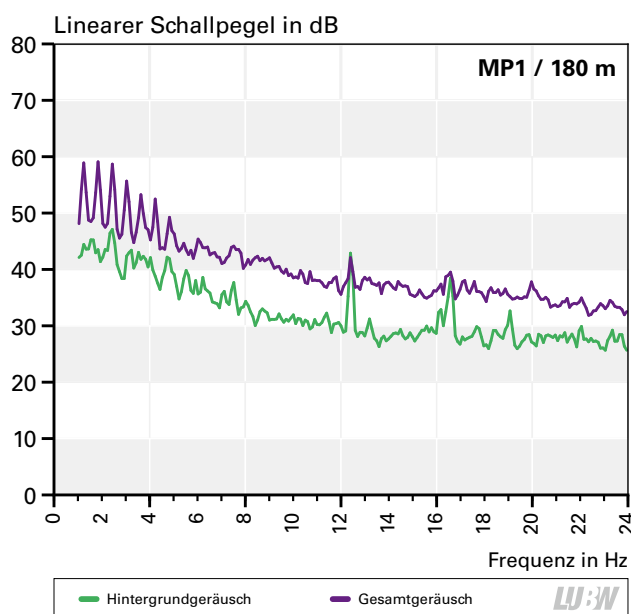
**Abbildung 4.5-5:** Während der Messung werden laufend im Inneren der Anlage Daten erfasst und per Funk übermittelt (links). Foto: LUBW

reich von 979 bis 981 hPa und in einem Leistungsbereich von 0 bis 3170 kW. Die Turbulenzintensität (siehe Anhang A3) betrug während der Messung 15 %.

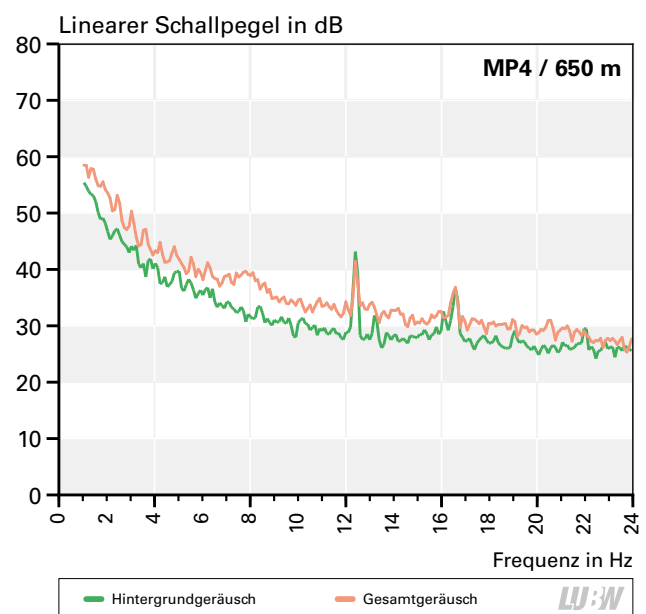
#### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In der **Abbildung 4.5-6** sind die Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 180 m Entfernung mit einer Auflösung von 0,1 Hz dargestellt. Bei eingeschalteter Anlage sind im Infraschallbereich deutlich sichtbare Maxima zu erkennen. Die gemessenen Frequenzen entsprechen der Durchgangsfre-

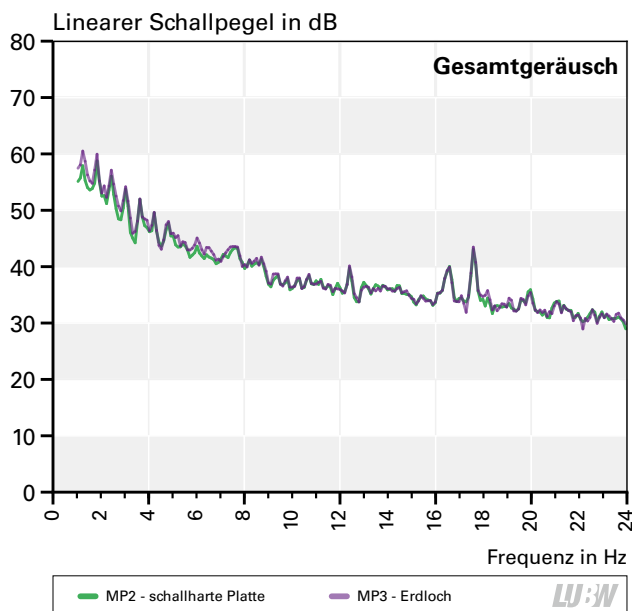
quenz eines Rotorblattes (hier ca. 0,6 Hz) und seinen harmonischen Oberschwingungen bei 1,2 Hz, 1,8 Hz, 2,4 Hz, 3 Hz usw. Hierbei handelt es sich um Infraschall, den der Rotor infolge seiner Bewegung erzeugt. Die Pegelspitzen verschwinden mit dem Abschalten der Anlage. **Abbildung 4.5-7** zeigt die Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP4 in 650 m Entfernung. An diesem Ort sind bei eingeschalteter Windenergieanlage die diskreten Infraschallmaxima (siehe Messpunkt MP1) noch nachweisbar. Die am Messpunkt MP4 bei Frequenzen unter 5 Hz erkennbaren leicht



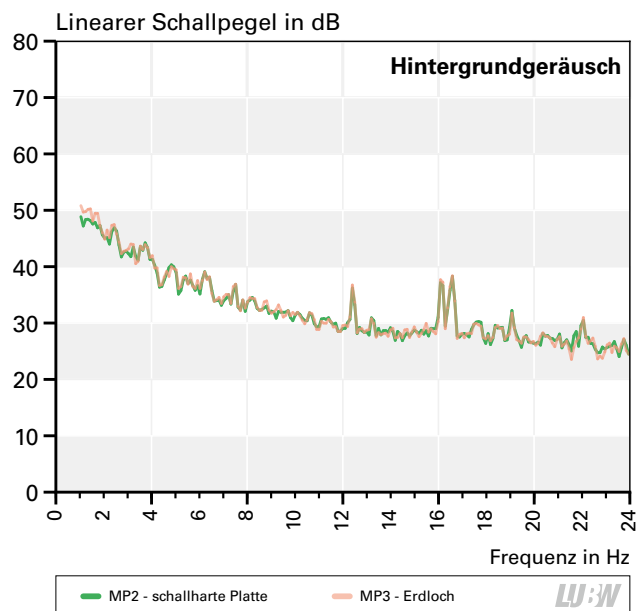
**Abbildung 4.5-6:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 4 für den Frequenzbereich des Infraschalls



**Abbildung 4.5-7:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Fernbereich der Windenergieanlage WEA 4 für den Frequenzbereich des Infraschalls



**Abbildung 4.5-8:** Schmalbandspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP2 (schallharte Platte) und MP3 (Erdloch) der Windenergieanlage WEA 4 für den Infraschallbereich. Die Entfernung von der Anlage betrug 300 m.

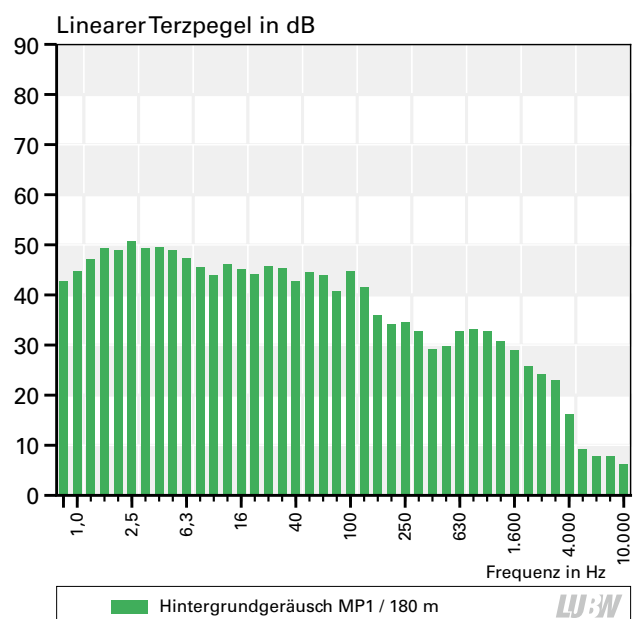
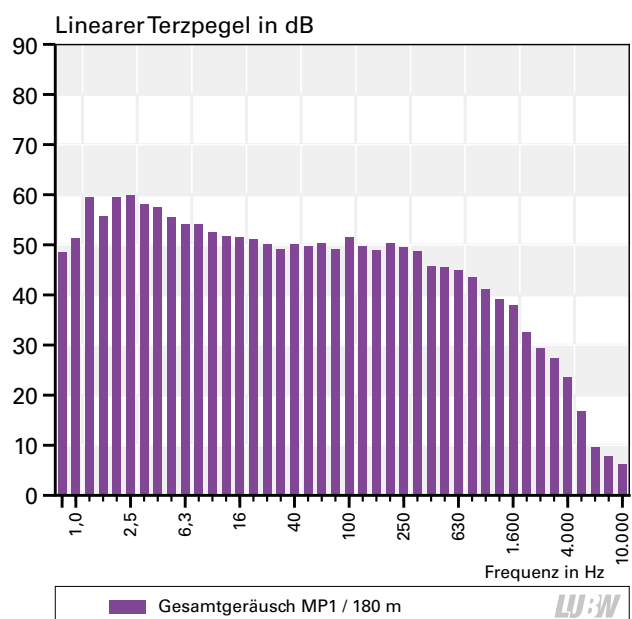


**Abbildung 4.5-9:** Schmalbandspektren des Hintergrundgeräuschs an den Messpunkten MP2 (schallharte Platte) und MP3 (Erdloch) der Windenergieanlage WEA 4 für den Infraschallbereich. Die Entfernung von der Anlage betrug 300 m.

erhöhten Pegel lassen sich nicht auf den Anlagenbetrieb zurückführen. Ursache für die bis zu 10 dB höheren Werte ist ein anderes Hintergrundgeräusch am Messpunkt MP4 im Vergleich zum Messpunkt MP1. Die Windgeschwindigkeit betrug bei beiden Messungen 5,5 m/s.

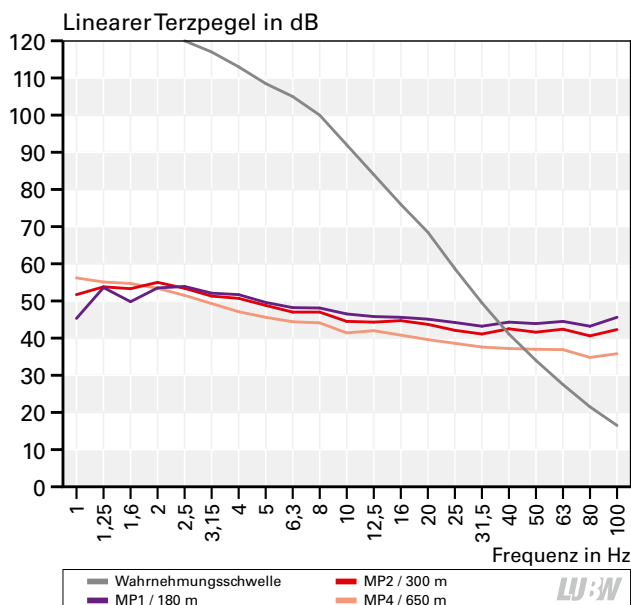
Die Gegenüberstellung der Schmalbandspektren für die beiden Messpunkte MP2 und MP3 in den **Abbildungen 4.5-8 und 4.5-9** lässt erkennen, dass für den Bereich des Infraschalls kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Messpunkten besteht. Die Windgeschwindigkeit

betrug jeweils 5,5 m/s. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass unterhalb 20 Hz weder die Absorption des Sekundärwindschirms noch Bodeneinflüsse eine Rolle spielen. Der Pegelanstieg hin zu tiefen Frequenzen war bei dieser Messung sowohl mit als auch ohne Erdloch gleichermaßen vorhanden. Die erwartete Reduzierung des windinduzierten Hintergrundgeräuschs im Infraschallbereich kann beim direkten Vergleich zwischen den beiden Messpunkten nicht beobachtet werden. Auf weitergehende Untersuchungen zur Frage der durch den Wind am Mikrofon induzierten Geräusche wurde daher verzichtet.



**Abbildung 4.5-10:** Terzspektr von Gesamtgeräusch und Hintergrundgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 4





**Abbildung 4.5-11:** Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1 (180 m), MP2 (300 m) und MP4 (650 m) der WEA 4, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.

#### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

In der **Abbildung 4.5-10** sind die Terzspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 180 m Entfernung für den Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 5,5 m/s. Die Pegelreduktion durch das Abschalten der Anlage ist hier in einem deutlich breiteren Spektralbereich erkennbar.

#### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

In der **Abbildung 4.5-11** sind die Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1, MP2 und MP4 für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz zusammen mit der Wahrnehmungsschwelle im Vergleich dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 5,5 m/s. Zu beachten ist, dass jeweils auch die Hintergrundgeräusche von Wind und Vegetation enthalten sind; diese können am jeweiligen Messort unterschiedlich sein. Die Messpunkte MP2 und MP4 sind von der Anlage weiter entfernt als MP1 (300 m bzw. 650 m gegenüber 180 m). Man misst dort dann auch etwas niedrigere Werte, was mit steigender Frequenz deutlicher wird. Im Bereich des Infraschalls liegen die Kurven deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

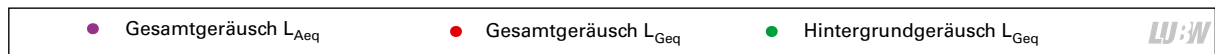
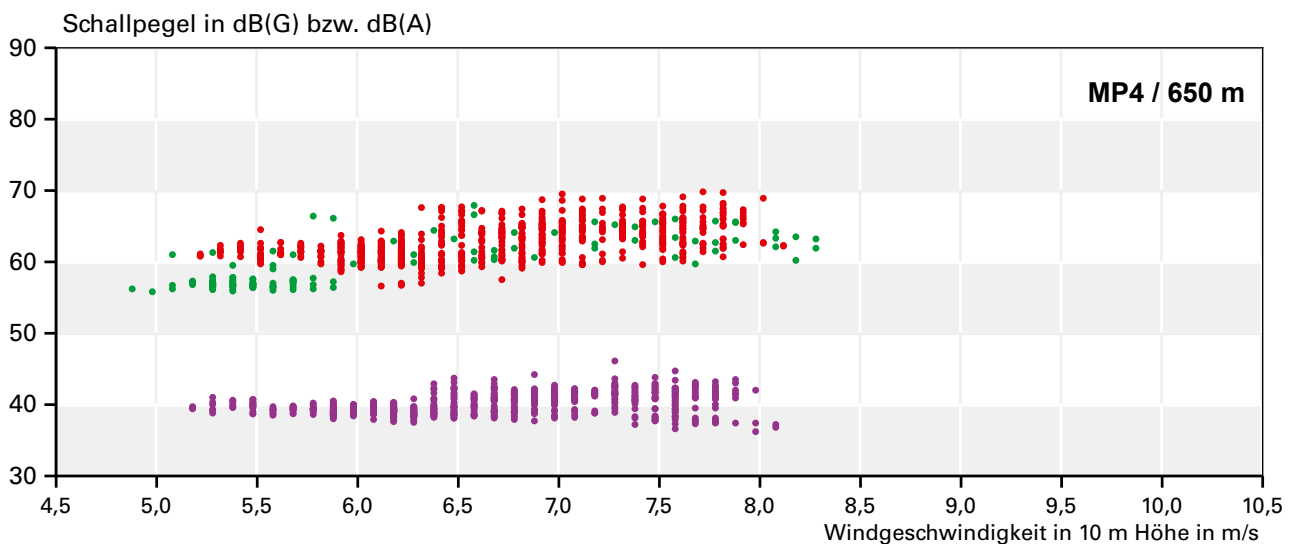
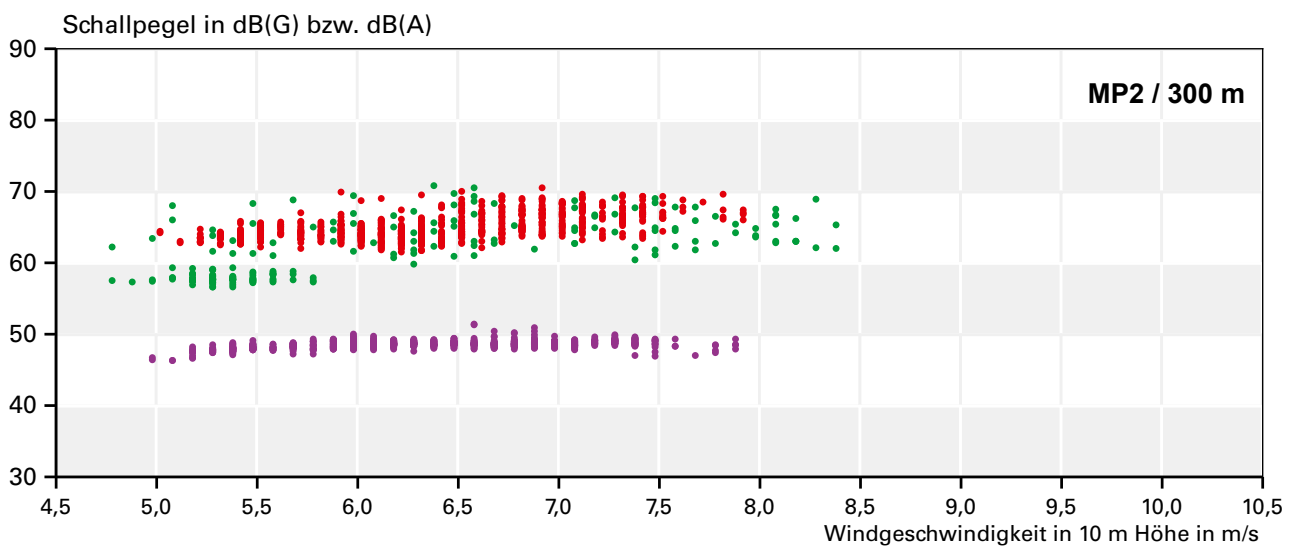
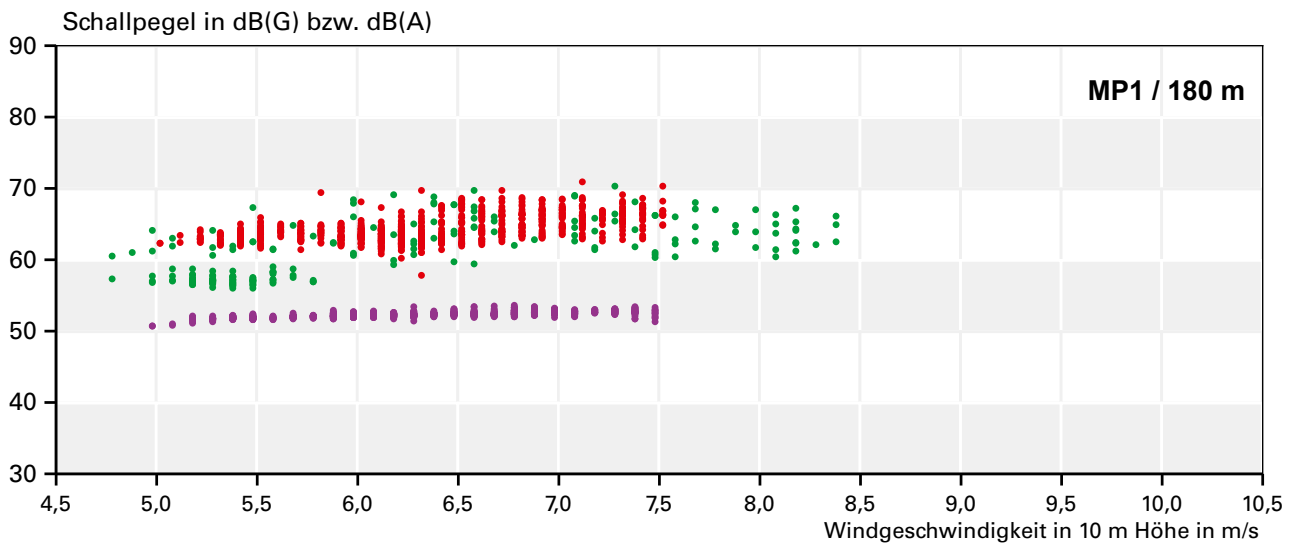
#### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der tieffrequenten Emissionen von der Windgeschwindigkeit wurde eine Vielzahl von Messwerten erfasst und in **Abbildung 4.5-12** grafisch dargestellt. Die drei Schaubilder stellen die Verhältnisse an den jeweiligen Messpunkten in den Entfernungen 180 m (oben), 300 m (Mitte) und 650 m (unten) dar. Die violetten Punkte, die jeweils den unteren Wertebereich bilden, stellen den Hörschall dar, angegeben in dB(A). Gut erkennbar ist, dass im Abstand 180 m (oberes Bild) die gemessenen A-Pegel höher liegen als bei den Messpunkten in 300 m bzw. 650 m Entfernung zur Anlage.

Die roten Punkte stellen den G-bewerteten Schallpegel bei eingeschalteter Anlage dar, die grünen Punkte bei ausgeschalteter Anlage. Die Daten zeigen, dass der G-bewertete Schalldruckpegel an den untersuchten Messpunkten bei Betrieb der WEA mit steigender Windgeschwindigkeit leicht ansteigt. Für den G-bewerteten Schalldruckpegel des Hintergrundgeräuschs kann für die überwiegende Messzeit kein Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit festgestellt werden. Die Messwerte liegen aber auch bei ausgeschalteter Anlage aufgrund stark schwankender Windverhältnisse (Böen, Turbulenzen) in der gleichen Größenordnung. Lediglich für einen späten, etwa 30-minütigen Messzeitraum ab 20:50 Uhr wurden für das Hintergrundgeräusch geringere Pegel festgestellt. In diesem Zeitraum lag die mittlere normierte Windgeschwindigkeit relativ konstant bei 5,5 m/s.

#### PEGELVERLAUF WÄHREND DER MESSUNG

Die **Abbildung 4.5-13** zeigt die A- und G-bewerteten Pegelverläufe zwischen 16 Uhr und 21 Uhr für die Abstände 180 m und 650 m. Zusätzlich sind die Betriebszustände der WEA (grün = Anlage an, hellblau = Anlage aus) sowie Zeiträume mit Fremdgeräuschen (violett) dargestellt. Bei den beiden Pegelverläufen des Messpunktes MP1 ist die Betriebsphase „Anlage aus“ durch die deutlich abfallenden Pegelverläufe erkennbar. Auch am Messpunkt MP3 ist ein Pegelabfall bei abgeschalteter Anlage erkennbar.



**Abbildung 4.5-12:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage WEA 4. Dargestellt sind die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) und bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte) sowie die A-Pegel bei eingeschalteter Anlage (violette Punkte).



## 4.6 Geräusche Windenergieanlage 5: Nordex N117 – 2,4 MW

### RAHMENBEDINGUNGEN

Bei der Windenergieanlage 5 (WEA 5) handelt es sich um eine Anlage der Fa. Nordex, Typ N117/2400, mit einer Nennleistung des Generators von 2,4 MW (**Abbildung 4-3 und 4.6-1**). Der Rotordurchmesser beträgt 117 m, die Nabenhöhe über Grund 140,6 m.

Die gemessene Anlage ist Teil eines Windparks mit mehreren Windkraftanlagen. Die benachbarten Anlagen wurden während des Messzeitraumes komplett abgeschaltet, um Fremdgeräusche zu verhindern. Die Umgebung der Anlage besteht aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. In unmittelbarer Umgebung zu den Anlagen befindet sich ein sehr wenig befahrener Feldweg, der nur von land- und forstwirtschaftlichem Verkehr genutzt wurde. Etwa 400 m südlich der untersuchten Windenergieanlage befindet sich eine Kreisstraße, rund 1 000 m östlich eine weitere Straße.



**Abbildung 4.6-1:** Windenergieanlage WEA 5 mit landwirtschaftlich genutztem Umfeld. Im Vordergrund erkennt man den 10 m hohen Windmessmast. Foto: Fa. Wölfel

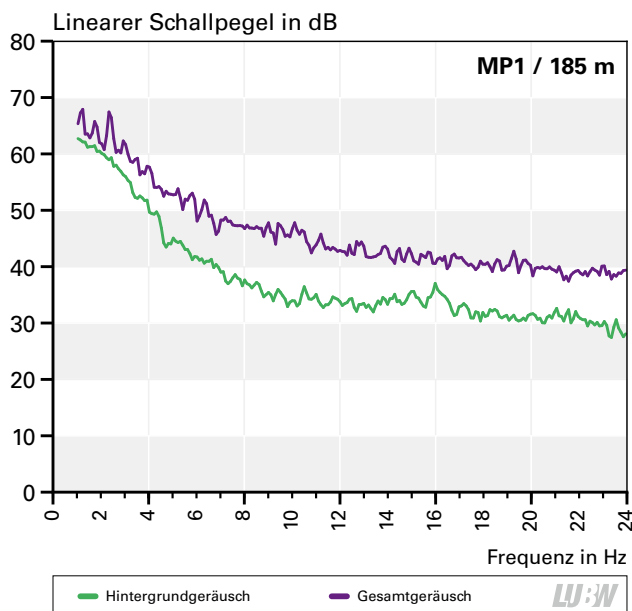
Während der Messung waren subjektiv keine Verkehrsgeräusche wahrnehmbar. In größerer Entfernung befindet sich Wald. Die Messungen erfolgten am 13.01.2015 zwischen 11 Uhr und 16 Uhr. Die Mikrofonposition des Messpunkts MP1 war 185 m von der Anlage entfernt, des Messpunkts MP2 300 m und der Messpunkte MP3 und MP4 jeweils 650 m. Alle Messpunkte befanden sich in Mitwindrichtung, um den in der Regel ungünstigsten Fall zu berücksichtigen (Begünstigung der Schallausbreitung durch den Wind). Die Messpunkte MP3 und MP4 lagen unmittelbar nebeneinander und dienten einem Vergleich. Das Mikrofon MP3 war mit einem primären Windschirm versehen und ca. 50 cm tief in einem eigens dafür ausgehobenen Loch platziert. Ein sekundärer Windschirm deckte das Loch bündig ab. An den Messpunkten MP3 und MP 4 erfolgten Parallelmessungen, die einen Vergleich der Pegel sowie Rückschlüsse auf windinduzierte Schallanteile erlauben, welche am Mikrofon entstehen.

Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 5 bis 12 m/s (gemessen in 10 m Höhe), einem Temperaturbereich von 10 bis 13 °C, einem Luftdruckbereich von 975 bis 979 hPa und in einem Leistungsbereich von 0 bis 2 400 kW. Die Turbulenzintensität (siehe Anhang A3) betrug während der Messung 13 %.

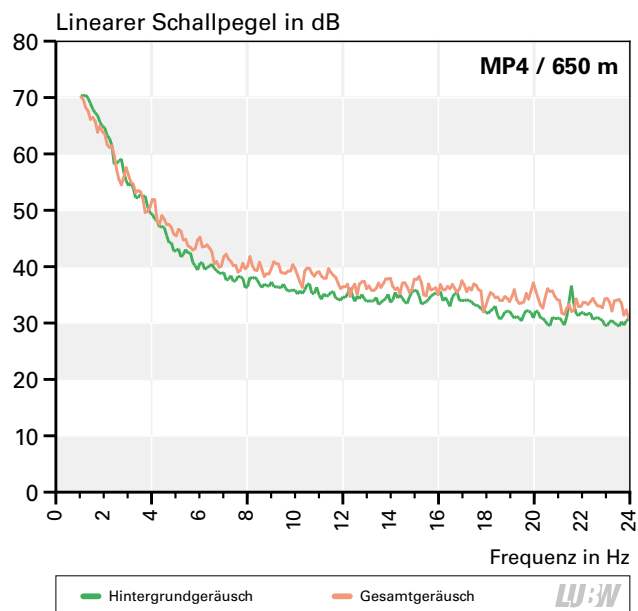
### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In den **Abbildungen 4.6-2 bis 4.6-5** sind Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch für verschiedene Messorte mit einer Auflösung von 0,1 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug jeweils 7,6 m/s bei der Messung des Gesamtgeräuschs und 6,9 m/s bei der Messung des Hintergrundgeräuschs.

**Abbildung 4.6-2** zeigt die Ergebnisse für Messpunkt MP1 in 185 m Entfernung. Bei eingeschalteter Anlage sind im Infraschallbereich unterhalb 6 Hz mehrere diskrete Maxima zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Infraschall, den der Rotor infolge seiner Bewegung erzeugt. Die gemessenen Frequenzen entsprechen der Durchgangsfrequenz eines Rotorblattes von etwa 0,6 Hz und seinen harmonischen Obertönen bei 1,2 Hz, 1,7 Hz, 2,3 Hz, 2,9 Hz, 3,5 Hz, 3,9 Hz usw. Die Pegelspitzen verschwinden mit dem Abschalten der Anlage.



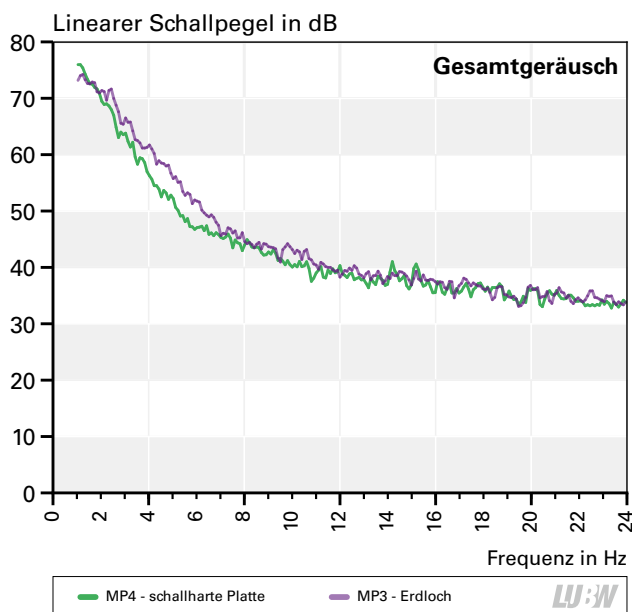
**Abbildung 4.6-2:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 5 für den Frequenzbereich des Infraschalls



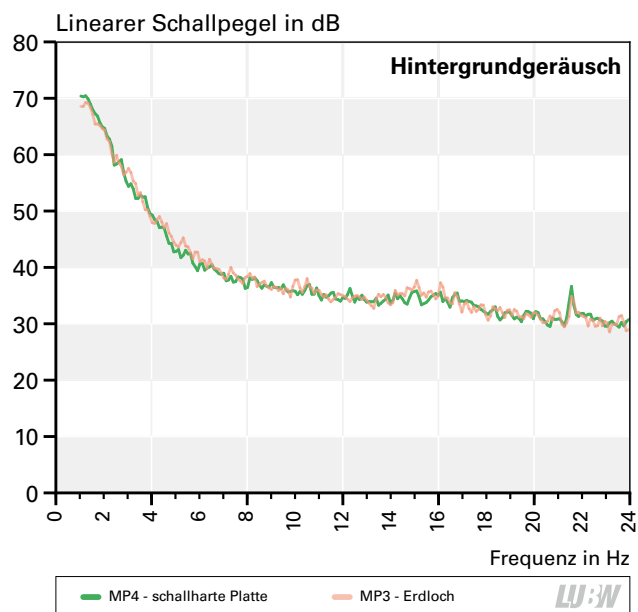
**Abbildung 4.6-3:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Fernbereich der Windenergieanlage WEA 5 für den Frequenzbereich des Infraschalls

In der **Abbildung 4.6-3** sind die Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch für den Messpunkt MP4 in 650 m Entfernung dargestellt. In dieser Entfernung sind bei eingeschalteter Windenergieanlage die Infraschallmaxima vom Messpunkt MP1 nicht mehr auszumachen. Zwischen den Zuständen „Anlage ein“ und „Anlage aus“ gab es bei dieser Messung in 650 m Entfernung für den Bereich des Infraschalls nur geringfügige Unterschiede.

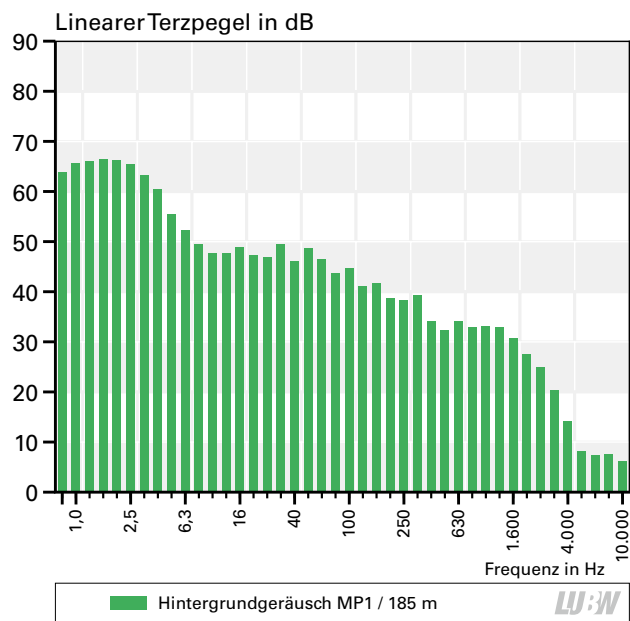
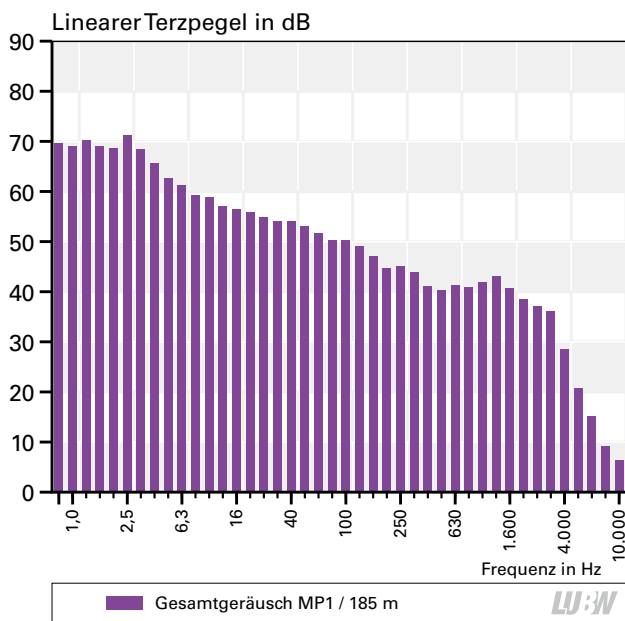
de. Ursächlich für den Infraschall waren hier im Wesentlichen Geräusche des Windes und aus der Umgebung. Die Gegenüberstellung der Schmalbandspektren für die beiden 650 m entfernten Messpunkte MP3 (Erdloch) und MP4 (schallharte Platte) in den **Abbildungen 4.6-4 und 4.6-5** verdeutlicht, dass im Infraschallbereich insgesamt kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Messpunkten besteht. Lediglich bei Frequenzen zwischen 2 Hz und 8 Hz



**Abbildung 4.6-4:** Schmalbandspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP4 (schallharte Platte) und MP3 (Erdloch) der Windenergieanlage WEA 5 für den Infraschallbereich. Die Entfernung von der Anlage betrug 650 m.



**Abbildung 4.6-5:** Schmalbandspektren des Hintergrundgeräuschs an den Messpunkten MP4 (schallharte Platte) und MP3 (Erdloch) der Windenergieanlage WEA 5 für den Infraschallbereich. Die Entfernung von der Anlage betrug 650 m.



**Abbildung 4.6-6:** Terzspektren von Gesamtgeräusch und Hintergrundgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 5

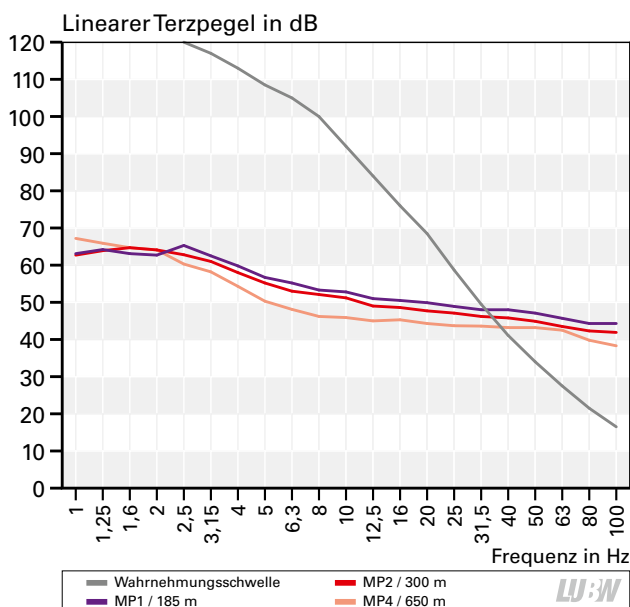
traten bei der Erdlochmessung leicht höhere Pegel auf. Weder die Absorption des Sekundärwindschirms noch Bodeneinflüsse scheinen unterhalb 20 Hz von Bedeutung zu sein. Der Pegelanstieg hin zu tiefen Frequenzen war bei dieser Messung mit und ohne Erdloch gleichermaßen vorhanden. Die erwartete Reduzierung des windinduzierten Hintergrundgeräuschs im Infraschallbereich kann beim direkten Vergleich zwischen den beiden Messpunkten nicht beobachtet werden (vgl. auch Abschnitt 4.5).

#### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

In der **Abbildung 4.6-6** sind die Terzspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 185 m Entfernung für Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 5,5 m/s. Erkennbar ist hier der Einfluss der Anlage in einem deutlich breiteren Spektralbereich.

#### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

In der **Abbildung 4.6-7** sind die Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1, MP2 und MP4 für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz zusammen mit der Wahrnehmungsschwelle im Vergleich dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 7 m/s. Zu beachten ist, dass jeweils auch die Hintergrundgeräusche (Wind, Vegetation) enthalten sind und diese am jeweiligen Messpunkt unterschiedlich sein können. Die Messpunkte MP2 und MP4 waren von der Anlage weiter entfernt als der Messpunkt MP1 (300 m bzw. 650 m gegenüber 185 m). Erwartungsgemäß wurden dort auch etwas niedrigere Werte gemessen, was mit steigender Frequenz deutlicher wird. Im Bereich des Infraschalls liegen die Kurven deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

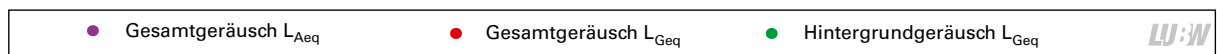
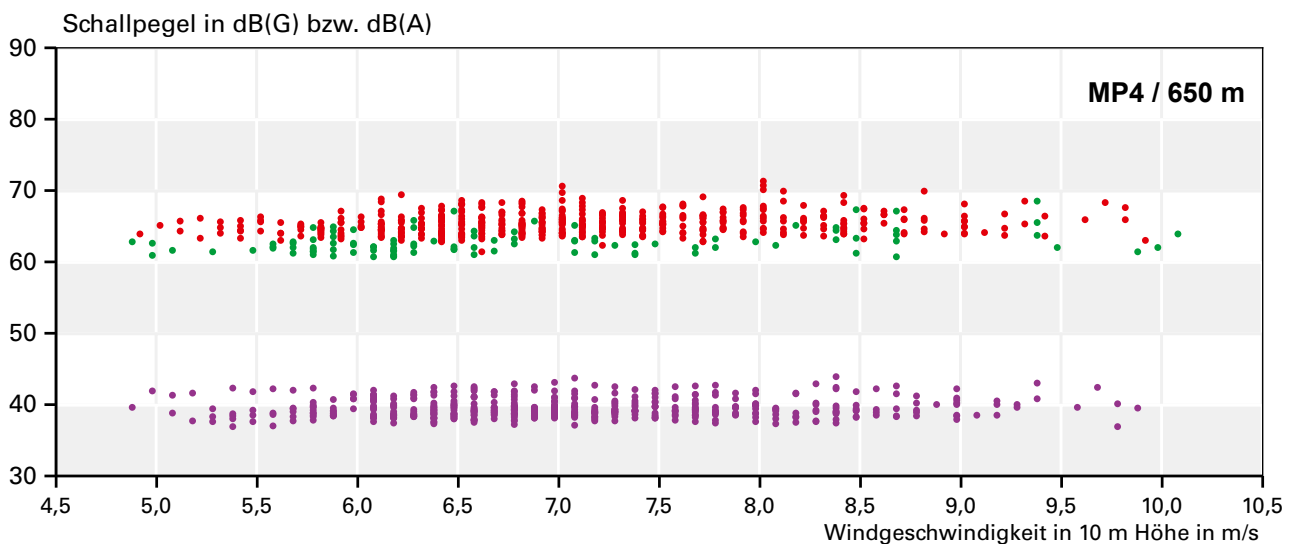
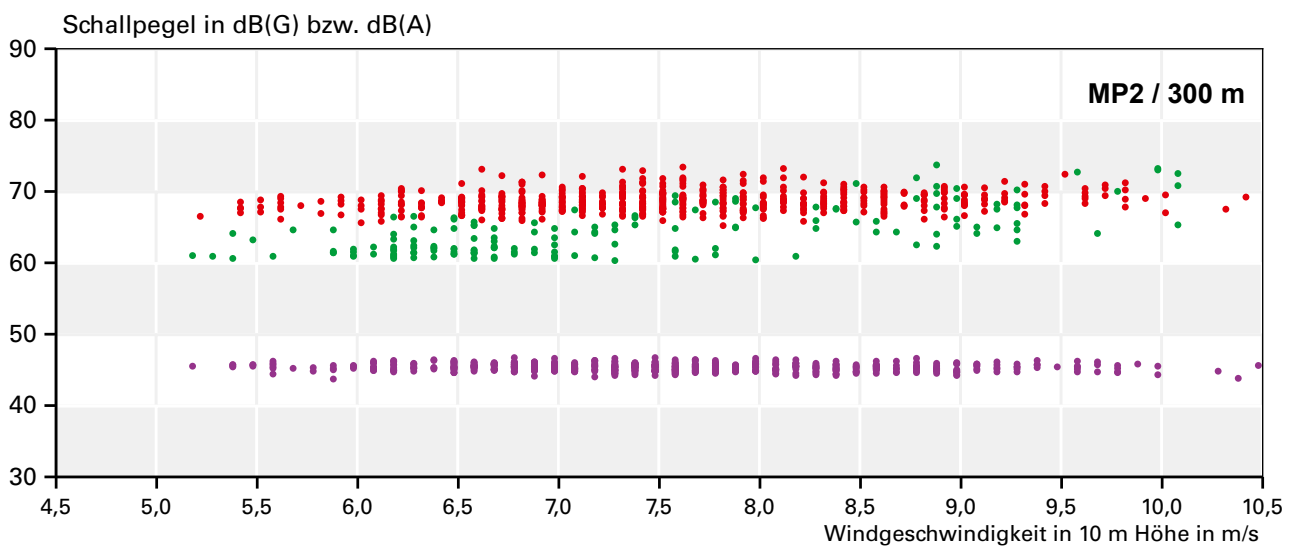
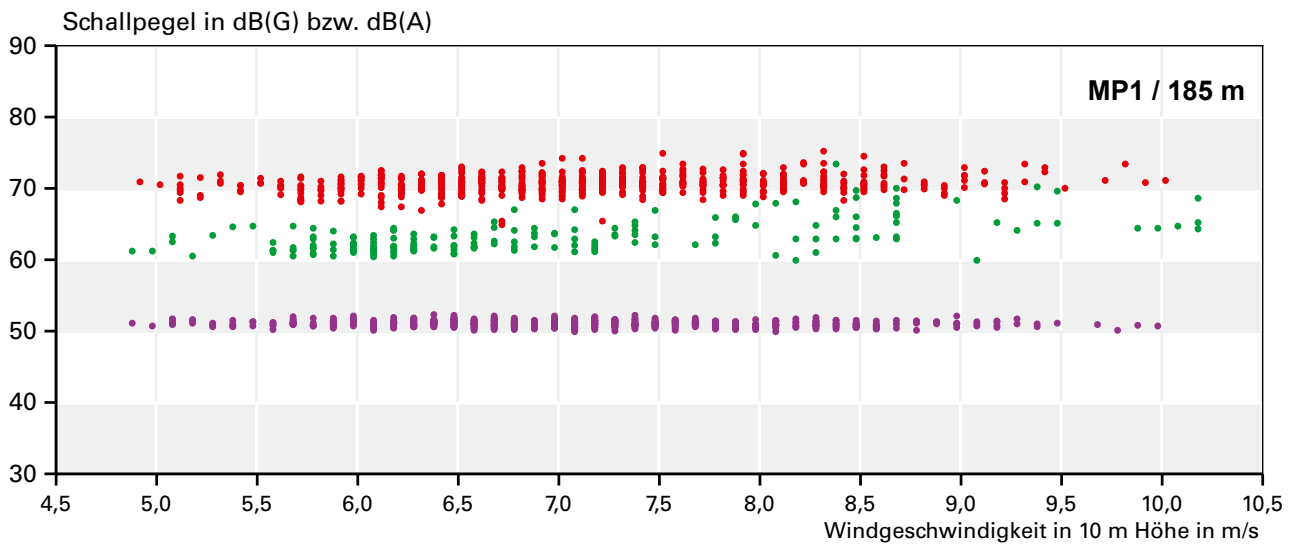


**Abbildung 4.6-7:** Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1 (185 m), MP2 (300 m) und MP4 (650 m) der WEA 5, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.

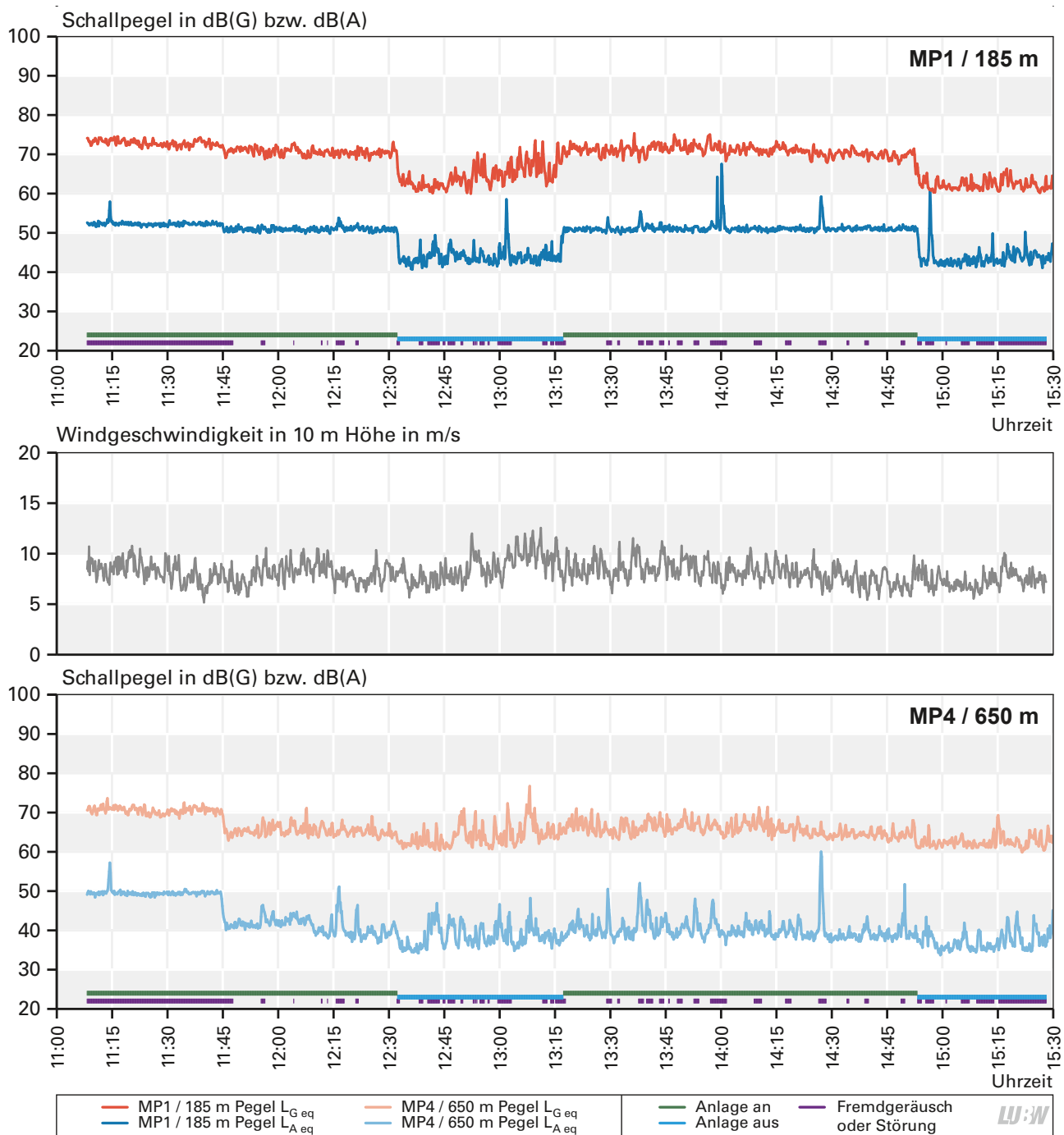
#### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der tieffrequenten Emissionen von der Windgeschwindigkeit wurde eine Vielzahl von Messwerten erfasst und in **Abbildung 4.6-8**





**Abbildung 4.6-8:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage WEA 5. Dargestellt sind die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) und bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte) sowie die A-Pegel bei eingeschalteter Anlage (violette Punkte).



**Abbildung 4.6-9:** Zeitlicher Verlauf des Hörschallpegels (A-Pegel), des Infraschallpegels (G-Pegel) sowie der Windgeschwindigkeit während der Messungen an der Windenergieanlage WEA 5

grafisch dargestellt. Die drei Schaubilder stellen die Verhältnisse an den Messpunkten MP1 (185 m), MP2 (300 m) und MP4 (650 m) dar.

Die violetten Punkte stellen den Hörschall dar, angegeben in dB(A). Gut erkennbar ist, dass in Anlagennähe die gemessenen A-Pegel höher liegen als bei den weiter entfernten Messpunkten. Die roten Punkte stellen den G-bewerteten Schallpegel bei eingeschalteter Anlage dar, die

grünen Punkte bei ausgeschalteter Anlage. Die Abbildung zeigt, dass der G-bewertete Schalldruckpegel an den untersuchten Messpunkten bei Betrieb und Stillstand der WEA keinen nennenswerten Zusammenhang mit dem Anstieg der Windgeschwindigkeit aufweist. Dieser recht konstante Pegelverlauf ist in dem A-bewerteten Pegelverlauf ebenfalls zu erkennen. Am Messpunkt MP1 ist ein deutlich erhöhter mittlerer G-Pegel bei Betrieb der WEA gegenüber dem Anlagenstillstand zu erkennen. Mit zunehmender Entfer-



**Abbildung 4.7-1:** Windenergieanlage WEA 6 mit landwirtschaftlich genutztem Umfeld. Im Vordergrund erkennbar der Messpunkt MP1 mit schallharter Platte und doppeltem Windschirm. Foto: Fa. Wölfel

nung verringert sich wie erwartet die Pegeldifferenz zwischen den Zuständen „Anlage ein“ und „Anlage aus“. Auch der A-Pegel sinkt von Werten über 50 dB(A) am Messpunkt MP1 auf Werte um 40 dB(A) am Messpunkt MP4.

#### PEGELVERLAUF WÄHREND DER MESSUNG

Die **Abbildung 4.6-9** zeigt die A- und G-bewerteten Pegelverläufe zwischen 11 Uhr und 15:30 Uhr für die Abstände 185 m und 650 m. Zusätzlich sind die Betriebszustände der WEA (grün = Anlage an, hellblau = Anlage aus) sowie Zeiträume mit Fremdgeräuschen (violett) dargestellt. Bei den beiden Pegelverläufen des Messpunktes MP1 ist die Betriebsphase „Anlage aus“ durch die deutlich abfallenden Pegelverläufe erkennbar. Am Messpunkt MP4 ist ein Pegelabfall bei abgeschalteter Anlage auf Grund des schwanken Hintergrundgeräusches nur noch schwach erkennbar.

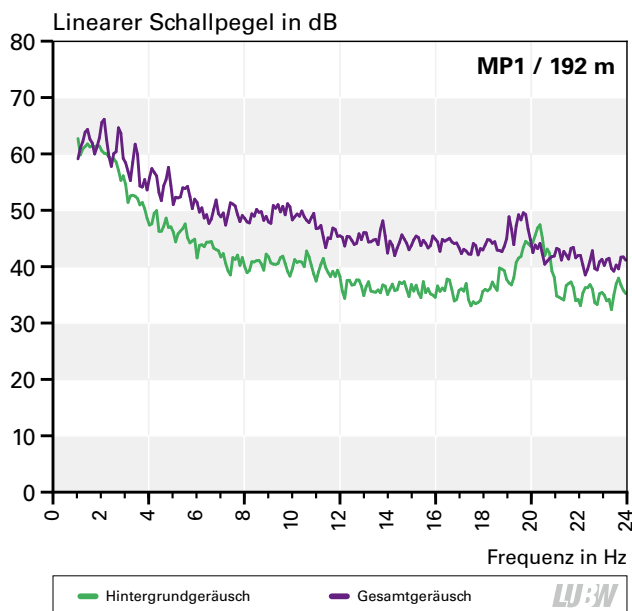
## 4.7 Geräusche Windenergieanlage 6: Enercon E-101 – 3,05 MW

### RAHMENBEDINGUNGEN

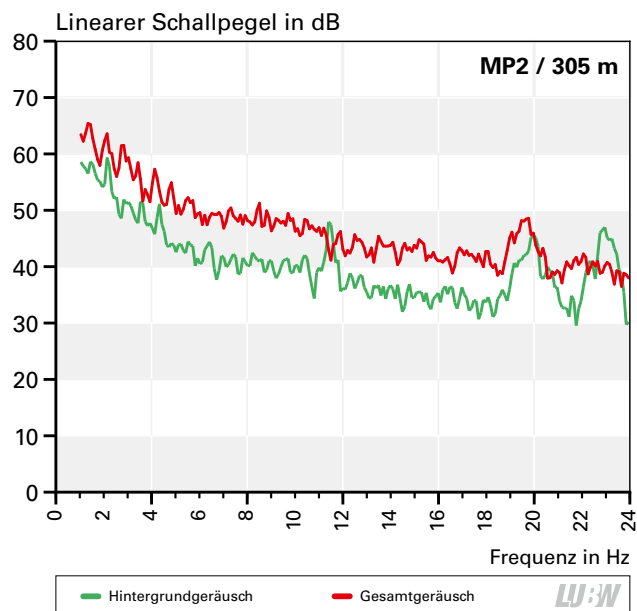
Bei der Windenergieanlage 6 (WEA 6) handelt es sich um eine Anlage der Fa. Enercon, Typ E-101 (**Abbildung 4-6**), mit einer Nennleistung des Generators von 3,05 MW. Der Rotordurchmesser beträgt 101 m, die Nabenhöhe über Grund 135,4 m.

Die gemessene Anlage ist Teil eines Windparks mit mehreren Windkraftanlagen. Die benachbarten Anlagen wurden während des Messzeitraumes komplett abgeschaltet, um Fremdgeräusche zu verhindern. Die nächstgelegene Anlage, die sich während des Messzeitraums in Betrieb befand, war ca. 850 m entfernt und über die komplette Messdauer subjektiv nicht wahrnehmbar. Die Umgebung der Anlage besteht überwiegend aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. In unmittelbarer Umgebung der Anlagen befindet sich ein sehr wenig befahrener Feldweg, der nur von land- und forstwirtschaftlichem Verkehr genutzt wurde. In ca. 480 m Entfernung in östlicher Richtung zur untersuchten Windenergieanlage befindet sich eine Staatsstraße. Während der Messung waren nur vereinzelt Verkehrsgerausche wahrnehmbar. Die Messungen erfolgten am 15.01.2015 zwischen 12 Uhr und 15 Uhr. Die Position des Mikrofons am Messpunkt MP1 lag in 192 m Abstand zur Anlage; der Messpunkt MP2 war 305 m und der Messpunkt MP3 705 m entfernt. Die Messpunkte lagen jeweils in Mitwindrichtung, um den in der Regel ungünstigsten Fall zu berücksichtigen (Begünstigung der Schallausbreitung durch den Wind). In **Abbildung 4.7-1** ist der Messpunkt MP1 und die zu messende Anlage erkennbar.

Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 2,8 bis 9,9 m/s (gemessen in 10 m Höhe), einem Temperaturbereich von 6 bis 7 °C, einem Luftdruckbereich von 954 bis 956 hPa und in einem Leistungsbereich von 0 bis 3 050 kW. Die Turbulenzintensität (siehe Anhang A3) betrug während der Messung 14 %.



**Abbildung 4.7-2:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 6 für den Frequenzbereich des Infraschalls

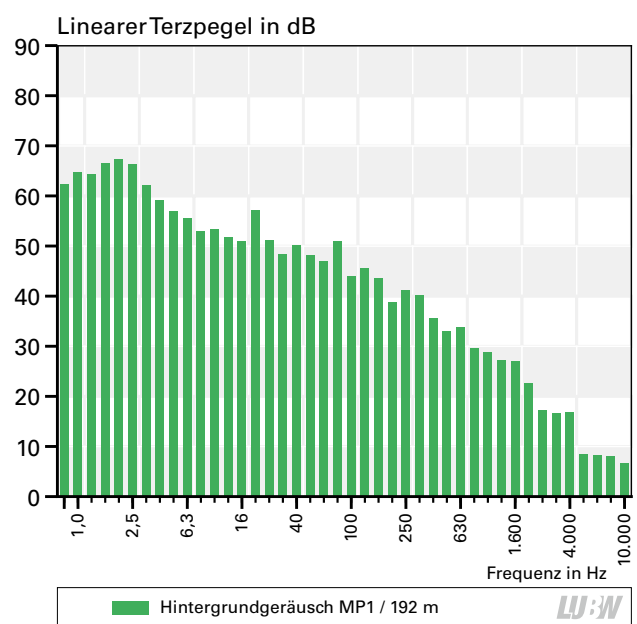
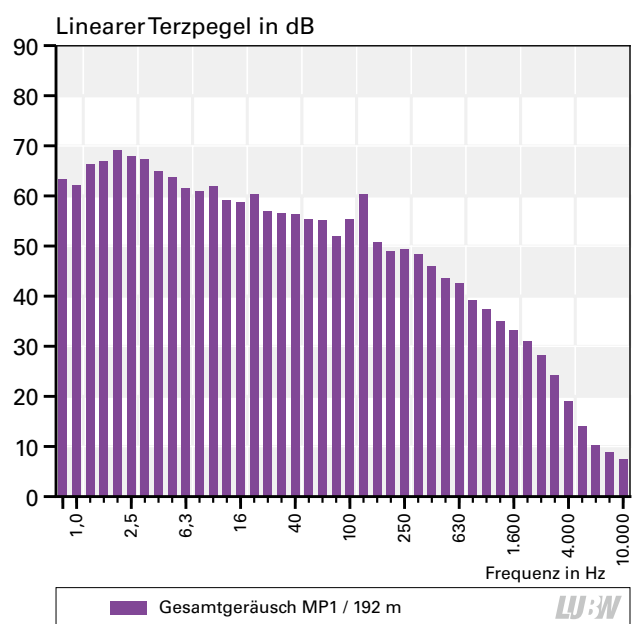


**Abbildung 4.7-3:** Schmalbandspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch im Fernbereich der Windenergieanlage WEA 6 für den Frequenzbereich des Infraschalls

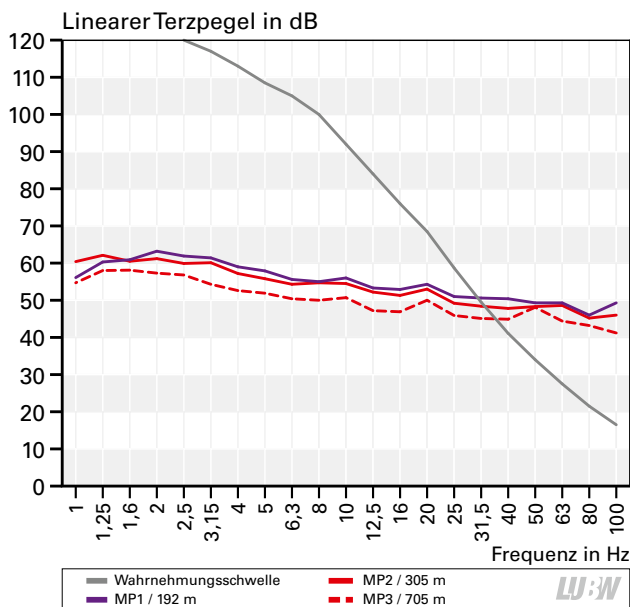
#### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In den **Abbildungen 4.7-2 bis 4.7-3** sind die ermittelten Schmalbandspektren für den Betrieb der WEA 6 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von ca. 5,6 m/s in 10 m Höhe dargestellt. An den Messpunkten MP1 und MP2 sind deutlich sichtbare Maxima zu erkennen. Die gemessenen Frequenzen entsprechen der Durchgangsfrequenz eines Rotorblattes (hier ca. 0,7 Hz) und den harmonischen Oberschwingungen bei 1,4 Hz, 2,1 Hz und 2,8 Hz. Hierbei

handelt es sich um Infraschall, den der Rotor durch seine Bewegung erzeugt. Die Pegelspitzen verschwinden mit dem Abschalten der Anlage. Am Messpunkt MP3 in 705 m Entfernung (nicht abgebildet) treten die genannten Maxima nicht mehr so deutlich auf. Auffällig ist das Pegelmaximum bei ca. 20 Hz, welches bei allen Messpunkten deutlich erkennbar ist. Dieses ist jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf die WEA zurückzuführen, da es auch deutlich im Hintergrundgeräusch zu erkennen ist.



**Abbildung 4.7-4:** Terzspektr von Gesamtgeräusch und Hintergrundgeräusch im Nahbereich der Windenergieanlage WEA 6



**Abbildung 4.7-5:** Terzspektren des Gesamtgeräusches an den Messpunkten MP1 (192 m), MP2 (305 m) und MP3 (705 m) der WEA 6, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.

#### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

In der **Abbildung 4.7-4** sind die Terzspektren von Hintergrundgeräusch und Gesamtgeräusch am Messpunkt MP1 in 192 m Entfernung für den Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 5,6 m/s. Erkennbar ist hier die Pegelreduktion durch das Ausschalten der Anlage in einem deutlich breiteren Spektralbereich.

#### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

Den tieffrequenten Bereich von 1 Hz bis 100 Hz stellt **Abbildung 4.7-5** für die drei Messpunkte vergleichend dar. Zu beachten ist, dass jeweils auch die Hintergrundgeräusche (Wind, Vegetation) enthalten sind und diese am jeweiligen Messpunkt etwas unterschiedlich sein können. Während des Mittelungszeitraums lag die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe bei durchschnittlich 5,6 m/s. An allen Messpunkten lagen bei Frequenzen tiefer als 30 Hz die ermittelten Pegel unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Die Pegel im Bereich des Infraschalls unterschritten die Wahrnehmungsschwelle deutlich.

#### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der tieffrequenten Emissionen von der Windgeschwindigkeit wurde eine Vielzahl von Messwerten erfasst und in **Abbildung 4.7-6** grafisch dargestellt. Die drei Schaubilder stellen die Verhältnisse an den drei Messpunkten in den Entfernungen 192 m, 305 m und 705 m dar.

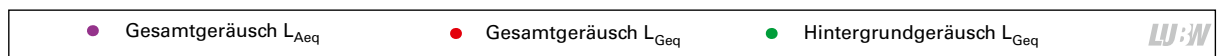
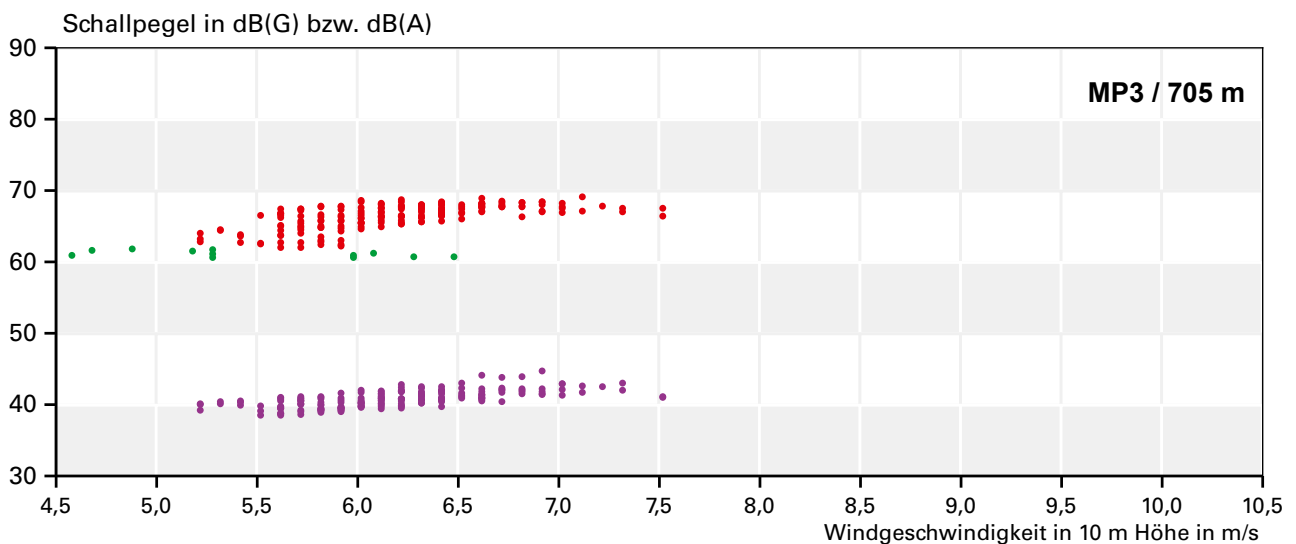
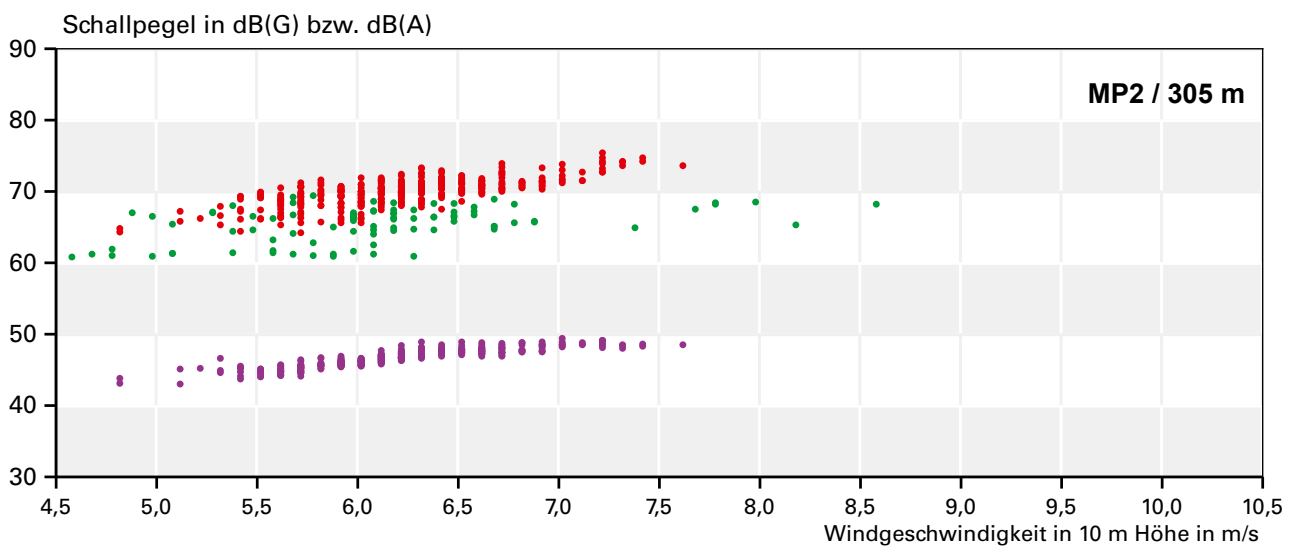
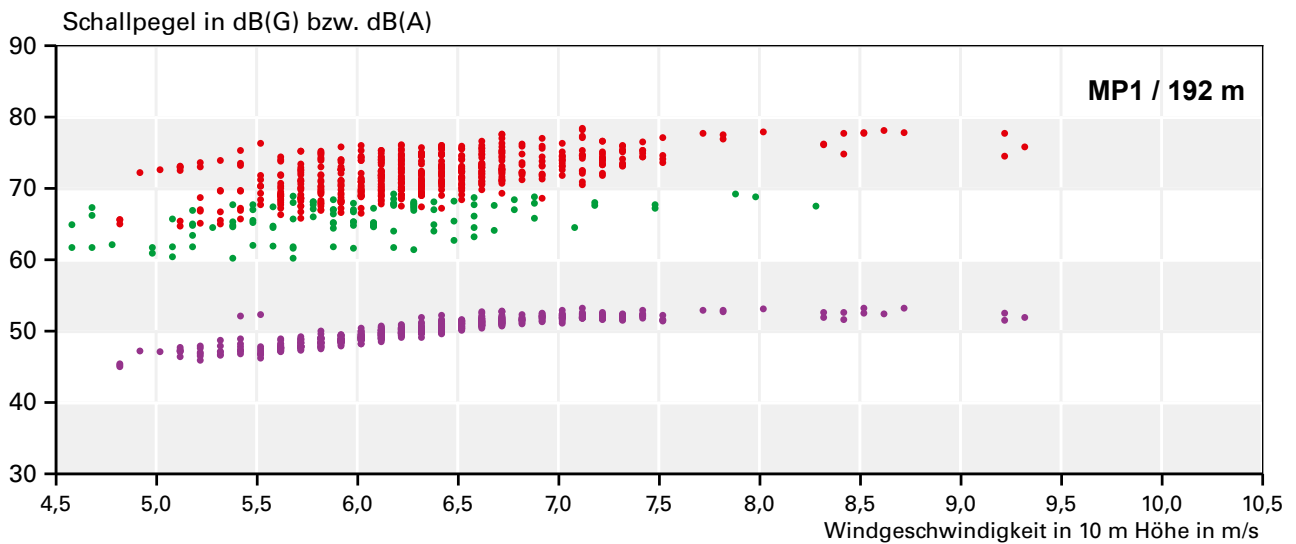
Die violetten Punkte, die jeweils den unteren Wertebereich bilden, stellen den Hörschall dar, angegeben in dB(A). Gut erkennbar ist, dass im Abstand 192 m (oberes Bild) die gemessenen A-Pegel höher liegen als bei den weiter entfernten Messpunkten. Der A-Pegel steigt zunächst mit höher werdender Windgeschwindigkeit an.

Die roten Punkte stellen den G-bewerteten Schallpegel bei eingeschalteter Anlage dar, die grünen Punkte bei ausgeschalteter Anlage. Ähnlich wie beim A-Pegel erkennt man – trotz höherer Streuung – auch beim G-Pegel, dass dieser mit zunehmender Windgeschwindigkeit etwas ansteigt und dann konstant bleibt (Messpunkt MP1).

Das obere Bild zeigt, dass am MP1, also im Nahfeld bei 192 m Entfernung zur Anlage, der G-bewertete Schalldruckpegel bei Betrieb der WEA 6 merklich höher ist als der des Hintergrundgeräusches bei ausgeschalteter Anlage. Viel weniger ausgeprägt ist dies in 305 m Entfernung (mittleres Bild).

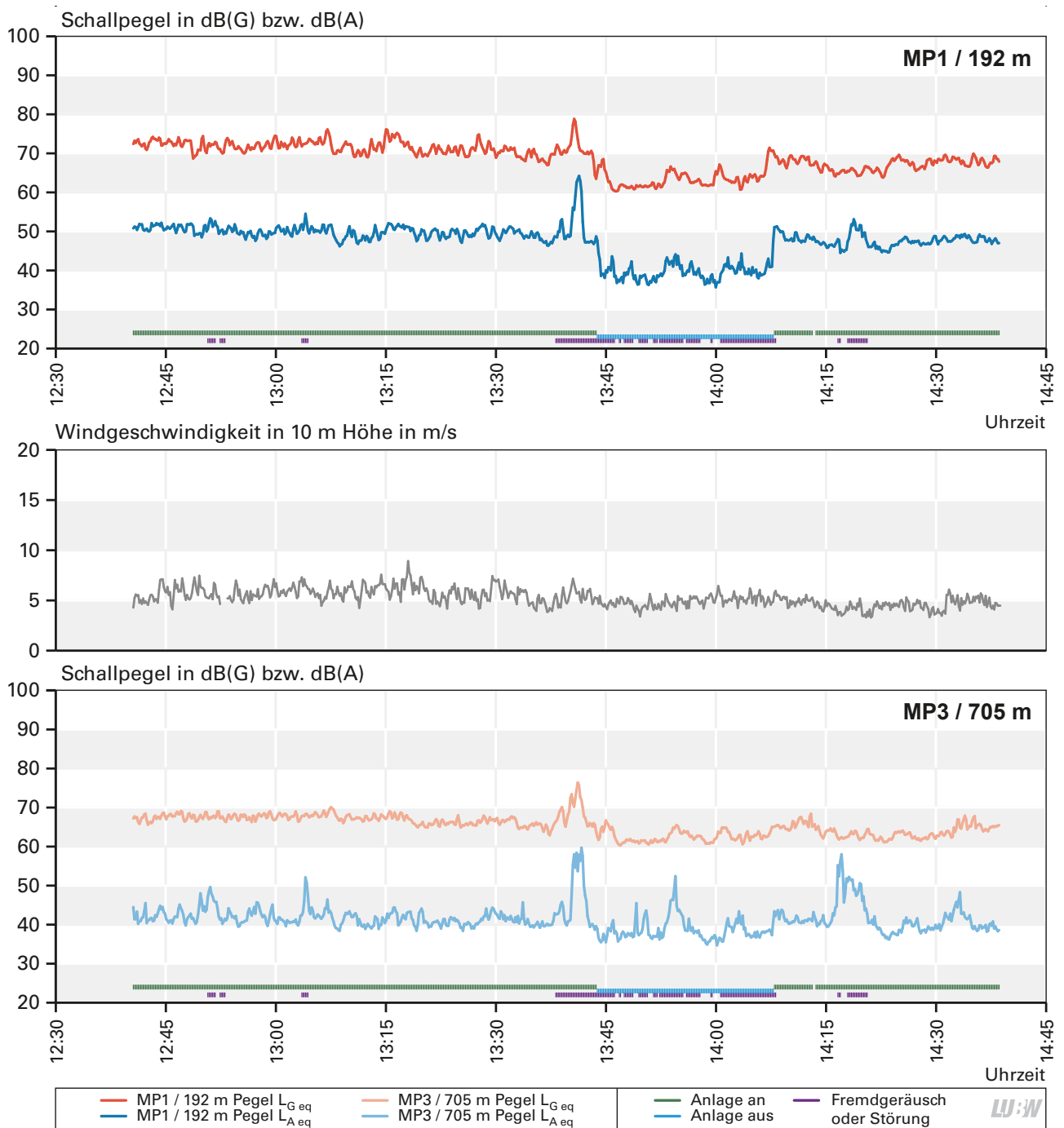
#### PEGELVERLAUF WÄHREND DER MESSUNG

Die **Abbildung 4.7-7** zeigt die A- und G-bewerteten Pegelverläufe zwischen 12:40 Uhr und 14:40 Uhr für die Abstände 192 m und 705 m. Zusätzlich sind die Betriebszustände der WEA (grün = Anlage an, hellblau = Anlage aus) sowie Zeiträume mit Fremdgeräuschen (violett) dargestellt. Bei den beiden Pegelverläufen des Messpunktes MP1 ist die Betriebsphase „Anlage aus“ durch die deutlich abfallenden Pegelverläufe erkennbar. Am Messpunkt MP3 ist ein Pegelabfall bei abgeschalteter Anlage auf Grund des schwankenden Hintergrundgeräusches kaum erkennbar.



**Abbildung 4.7-6:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Windenergieanlage WEA 6. Dargestellt sind die G-Pegel bei eingeschalteter Anlage (rote Punkte) und bei ausgeschalteter Anlage (grüne Punkte) sowie die A-Pegel bei eingeschalteter Anlage (violette Punkte).





**Abbildung 4.7-7:** Zeitlicher Verlauf des Hörschallpegels (A-Pegel), des Infraschallpegels (G-Pegel) sowie der Windgeschwindigkeit während der Messungen an der Windenergieanlage WEA 6

## 4.8 Erschütterungen Windenergieanlage 5: Nordex N117 – 2,4 MW

Um einen möglichen Einfluss der Anlage durch Schwingungsemissionen auf die Umgebung festzustellen, wurden ergänzend zu den schalltechnischen Untersuchungen in der Umgebung der Windkraftanlage 5 (WEA 5) Erschütterungsmessungen durchgeführt. Die Durchführung und Auswertung der Messungen erfolgte normgerecht nach DIN 45669 [12] und DIN 4150 [13].

### RAHMENBEDINGUNGEN

Bei WEA 5 handelt es sich um eine Anlage der Fa. Nordex, Typ N117/2400, mit einer Nennleistung des Generators von 2,4 MW (vgl. **Abbildung 4.6-1**). Der Rotordurchmesser beträgt 117 m, die Nabenhöhe über Grund 140,6 m. Zum Baugrund an der Anlage sind folgende Angaben bekannt: Bis in eine Tiefe von ca. 7 m steht bindiger Boden an (Lösslehm, Verwitterungslehm), der als nicht genügend tragfähig für die Gründung der Anlage bewertet wird. Erst ab einer Tiefe von ca. 7 m befindet sich Keupergestein, so dass die Gründung des Bauwerks bzw. die Lastabtragung in dieser Schicht erfolgen muss. Ob dies mit einer Pfahlgründung oder einem anderen Verfahren realisiert wurde, ist nicht bekannt.

Die Schwingungsmessung erfolgte mit Hilfe von Schwingungssensoren in alle drei Raumrichtungen. Die x-Achse war dabei radial zum Turm hin ausgerichtet, die y-Achse tangential und die z-Achse vertikal. Es wurde gleichzeitig an folgenden Punkten gemessen:

- MP A direkt am Turm nahe der WEA-Außenwand auf Beton, siehe **Abbildung 4.8-1**
- MP B in 32 m Abstand von der WEA-Außenwand auf einem Erdspeiß
- MP C in 64 m Abstand von der WEA-Außenwand auf einem Erdspeiß
- MP D in ca. 285 m Abstand von der WEA-Außenwand auf einem Erdspeiß, siehe **Abbildung 4.8-2**

Für die Ankopplung der Sensoren mittels Erdspeissen an das Erdreich wurden Löcher mit einem Durchmesser von ca. 50 cm und einer Tiefe von 20 cm bis 40 cm gegraben.

Während der Messzeit wurden die folgende Betriebszustände erfasst:



**Abbildung 4.8-1:** Erschütterungs-Messpunkt MP A am Turmfundament der WEA 5. Foto: Fa. Wölfel



**Abbildung 4.8-2:** Erschütterungs-Messpunkt MP D auf Erdspeiß in 285 m Abstand von der WEA 5. Foto: Fa. Wölfel

- Betrieb der WEA bei Windgeschwindigkeiten zwischen ca. 6 und 12 m/s in 10 m Höhe
- Abschalten und späteres Wiederanfahren der Anlage
- Stillstand sämtlicher Anlagen des Windparks

Die Windenergieanlage erreichte während der Messung die maximal möglichen Drehzahlen ab Windgeschwindigkeiten von 6,6 m/s. Auch bei höheren Windgeschwindigkeiten sind keine höheren Drehzahlen der Anlage zu erwarten.

### ERGEBNISSE

Während des Betriebs der Windenergieanlage zeigten sich immer wieder Schwankungen in den Signalen, insbesondere am Messpunkt MP A direkt am Turm. Diese sind auf einzelne Böen zurückzuführen. An den weiter entfernt gelegenen Messpunkten sind diese Effekte weniger stark ausgeprägt. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Änderungen der Windgeschwindigkeit im Bereich von 6 bis

**Tabelle 4.8-1:** Maximalwerte der unbewerteten Schwinggeschwindigkeiten  $v$  in mm/s an den Messpunkten. Die ermittelten Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über Gelände lagen zwischen etwa 6 und 12 m/s.

	MP A, am Turm		MP B, 32 m Abstand		MP C, 64 m Abstand		MP D, 285 m Abstand	
	z	x, y	z	x, y	z	x, y	z	x, y
Anlage in Betrieb	0,5 - 1,0	0,30	0,03	0,08	0,02	0,04	< 0,01	0,01
Anlage aus	0,04	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

LUBW

maximal 12 m/s und den Erschütterungen im Boden ist nicht zu erkennen. In der **Tabelle 4.8-1** sind die festgestellten Maximalwerte der unbewerteten Schwinggeschwindigkeiten  $v$  in mm/s für die verschiedenen Messpunkte bei gleichmäßigem Volllastbetrieb der Anlage zusammengestellt. Bei den horizontalen Messrichtungen wird jeweils die mit dem höheren Wert genannt; dies war in der Regel die x-Richtung (radial, zum Turm hin).

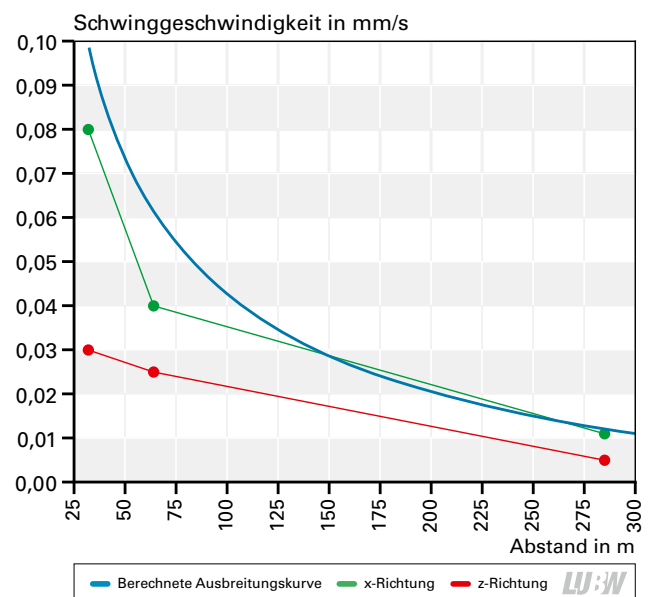
Die Abnahme der Schwinggeschwindigkeit über die Entfernung ist in **Abbildung 4.8-3** grafisch dargestellt. Am Messpunkt MP D in 285 m Entfernung ist der Einfluss der WEA kaum noch zu erkennen. Zum Vergleich ist die nach [13] berechnete Ausbreitung ebenfalls dargestellt. Beim Abschalten bzw. Wiederanfahren verändert sich das Schwingungsniveau nur geringfügig, siehe **Abbildung 4.8-4**.

Die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen hinsichtlich möglicher Belästigung von Menschen in Gebäuden erfolgt auf Grundlage von DIN 4150 Teil 2 [13]. Die wesentliche Grundgröße dieser Norm ist die bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$ . Diese gibt auch einen Hinweis auf die Fühlbarkeit von Erschütterungseinwirkungen. Die Fühlschwelle liegt bei den meisten Menschen im Bereich zwischen  $KB_F = 0,1$  und  $KB_F = 0,2$ . Der  $KB_F$ -Wert von 0,1 entspricht dabei einer unbewerteten Schwinggeschwindigkeit von ca. 0,15 bis 0,30 mm/s. Beim Übergang von Erschütterungen vom Erdreich auf Gebäudefundamente kommt es üblicherweise zu einer Abminderung der Schwingungs-Amplituden. Gemäß DIN 4150 Teil 1 ist hier ein Faktor von 0,5 anzusetzen. Im Gebäude kann es dagegen zu einer Verstärkung kommen, insbesondere dann, wenn die Anregungsfrequenz im Bereich der Deckeneigenfrequenz liegt. Es ist allerdings nicht davon auszugehen, dass die am Messpunkt MP D festgestellten Einwirkungen das Niveau der Anhaltswerte nach DIN 4150 Teil 2

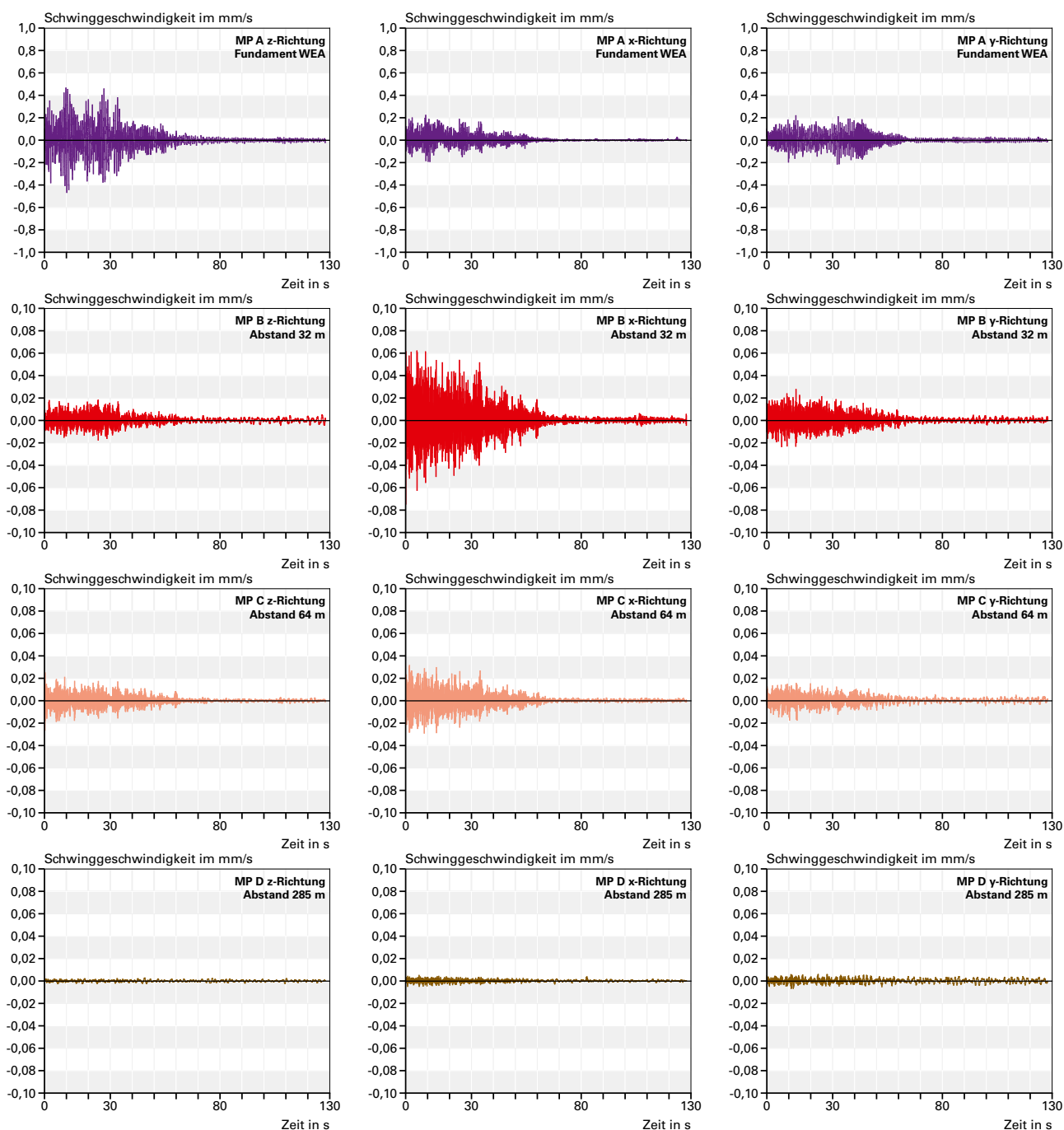
in einem Gebäude tatsächlich erreichen könnten, da hierzu innerhalb des Gebäudes eine Verstärkung um mehr als den Faktor 20 erforderlich wäre. Am Messpunkt MP D in 285 m Entfernung wurden vorwiegend Frequenzen unter 10 Hz nachgewiesen, siehe **Abbildung 4.8-5**. Die Eigenfrequenzen für Betondecken in Wohngebäuden betragen dagegen üblicherweise ca. 15 bis 35 Hz, bei Holzbalkendecken sind die Eigenfrequenzen niedriger und können bis ca. 10 Hz absinken. Es ist somit nicht von Resonanzanregung der Gebäudedecken auszugehen.

#### FAZIT

Die von Windkraftanlagen ausgehenden Schwingungen im Boden sind messtechnisch nachweisbar. Bereits in weniger als 300 m Abstand von der Anlage sind sie so weit abgesunken, dass sie sich aus dem überall permanent vorhandenen Grundrauschen nicht mehr herausheben. An Wohngebäuden sind keine relevanten Erschütterungseinwirkungen zu erwarten.

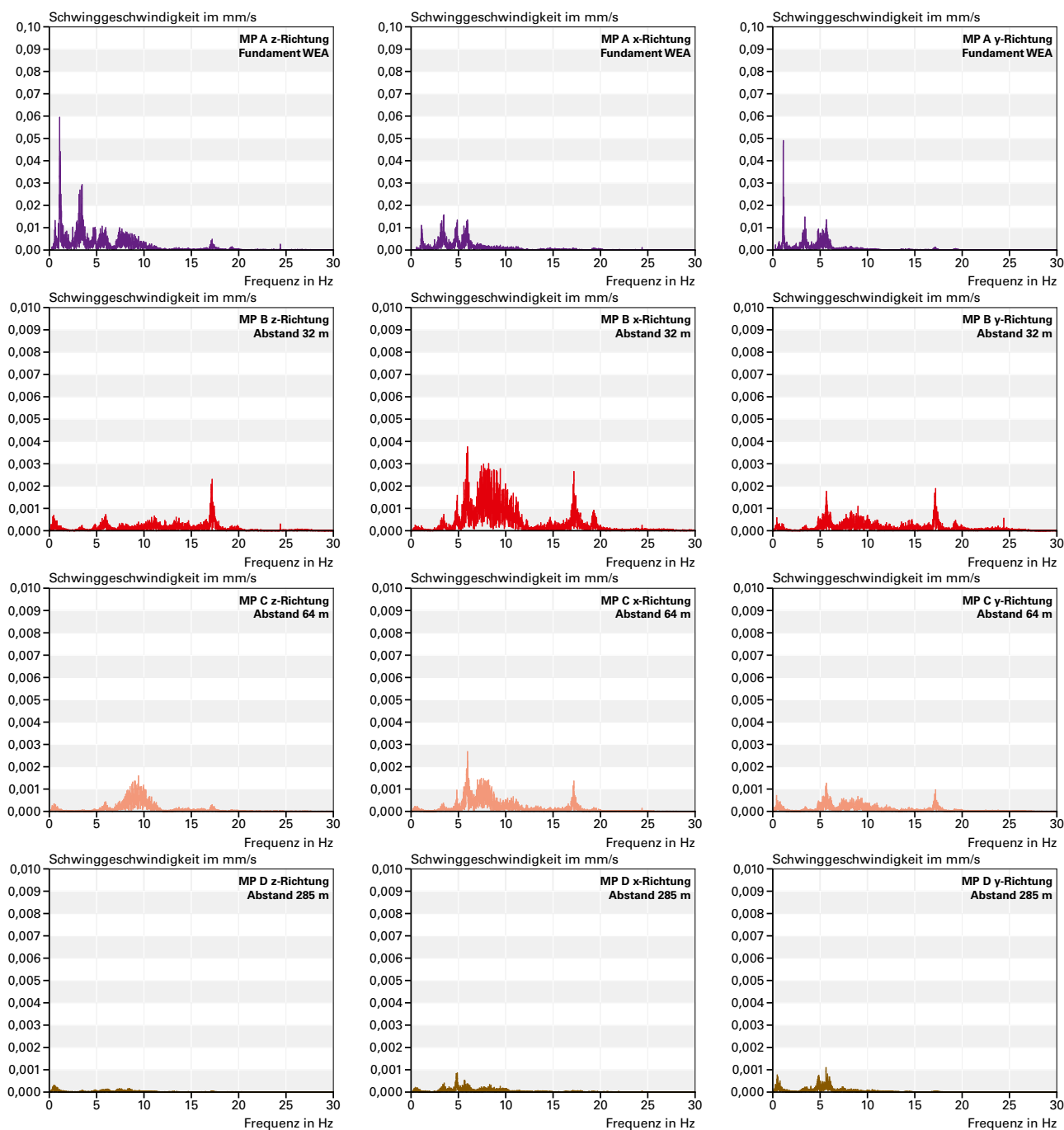


**Abbildung 4.8-3:** Vergleich der Prognoseformel nach [13] mit den Messwerten



LUBW

**Abbildung 4.8-4:** Darstellung der Abnahme der Vibrationen nach dem Abschalten der Windenergieanlage 5 für alle Messpunkte und Raumrichtungen. Von oben nach unten: Messpunkte MP A bis MP D; von links nach rechts: Raumrichtungen z, x und y. Die Abschaltung der Anlage erfolgte um 12:32 Uhr. – Beachte die abweichende Skalierung der Schwinggeschwindigkeit am Messpunkt MP A (Fundament, oberste Zeile).



LUBW

**Abbildung 4.8-5:** Darstellung des Frequenzspektrums der Vibrationen bei gleichmäßigem Betrieb der Windenergieanlage 5 für alle Messpunkte und Raumrichtungen. Die Messung erfolgte um 11:12 Uhr bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 8 m/s in 10 m Höhe. Von oben nach unten: Messpunkte MP A bis MP D; von links nach rechts: Raumrichtungen z, x und y. – Beachte die abweichende Skalierung der Schwinggeschwindigkeit am Messpunkt MP A (Fundament, oberste Zeile).



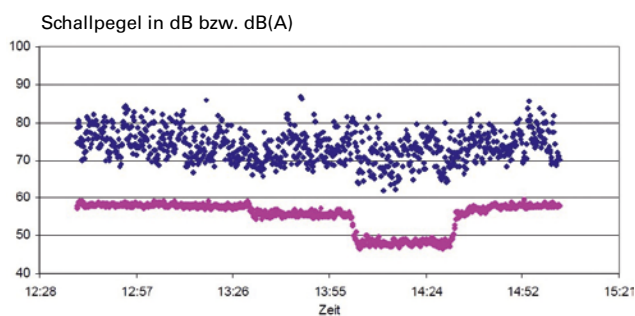
## 4.9 Messergebnisse aus der Literatur

Im Folgenden wird kurz auf einige wenige bisher vorliegende, öffentlich zugängliche Messergebnisse über Infraschall und tieffrequente Geräusche an Windenergieanlagen eingegangen. Insgesamt ist die Zahl der weltweiten Publikation zu diesem Thema überschaubar, aber auch nicht gering. In den hier vorgestellten Publikationen finden sich z. T. noch viele weitergehende Literaturverweise. In der Auswahl wollten wir einerseits deutschsprachige Publikationen vorstellen (Mecklenburg Vorpommern, Bayern), aber auch wichtige europäische (Dänemark) und internationale (Australien) Studien und Messprogramme benennen. Der hier vorliegende Bericht ist jedoch keine Literaturstudie, so dass eine Beschränkung notwendig ist.

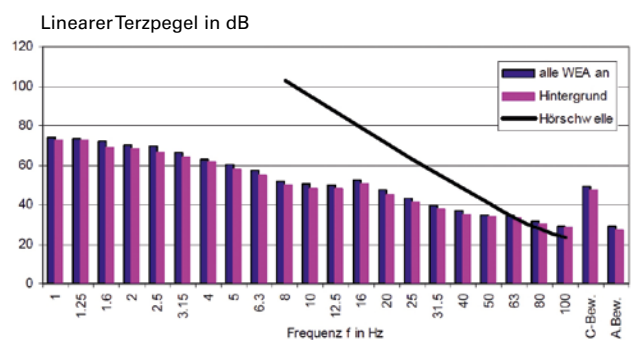
### MECKLENBURG-VORPOMMERN

Die Fa. Kötter Consulting, Rheine, führte in den Jahren 2005 und 2009 im Auftrag des Landes Mecklenburg Vorpommern, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG), Emissions- und Immissionsmessungen an einem Windpark durch, der insgesamt 14 Anlagen enthielt. Der Bericht ist öffentlich zugänglich [14]. Zusammenfassend kommen die Autoren zu folgenden Schlussfolgerungen:

- „Die Ergebnisse der Emissionsmessung [...] zeigen, dass bei Frequenzen im Infraschallbereich um  $f < 10$  Hz die einzelnen Betriebszustände nicht voneinander zu unterscheiden sind. Zudem ist die Streuung der Schalldruckpegel hoch.“ Siehe hierzu **Abbildung 4.9-1**.
- „Emissionsseitig sind allerdings die unterschiedlichen Betriebszustände im tieffrequenten Bereich ( $16 \text{ Hz} < f < 60 \text{ Hz}$ ) messtechnisch feststellbar, wohingegen am Immissionsort das Anlagengeräusch nicht vom Hintergrundgeräusch zu unterscheiden ist.“
- „Die Ergebnisse der Immissionsmessungen zeigen, [...] auch die Anhaltswerte zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach dem Beiblatt 1 der DIN 45680 [4] [...] sind eingehalten.“
- „Immissionsseitig ist zwischen den Betriebszuständen ‚alle WEA an‘ und dem Hintergrundgeräusch kein nennenswerter Unterschied zu erkennen. Die Hörschwellenkurve wird im Infraschallbereich deutlich unterschritten.“ Siehe hierzu **Abbildung 4.9-2**.



**Abbildung 4.9-1:** Pegel-Zeitverlauf am Emissionsort (außen) in Anlagennähe. Die untere, magentafarbene Kurve stellt den Verlauf des A-bewerteten hörbaren Schallpegels dar. Die deutlich erkennbare stufenweise Abnahme des Schallpegels korreliert mit den unterschiedlichen Betriebszuständen (ganz links alle Anlagen an, dann zwei Anlagen aus, dann alle Anlagen aus). Zuletzt erhöht sich der A-bewertete Schallpegel wieder, wenn alle Anlagen angeschaltet werden (ganz rechts). Bemerkenswerterweise verändert sich der 8-Hz-Infraschallpegel kaum merklich (blaue, stärker streuende Punkte). Im Messbericht finden sich auch Darstellungen für 20 Hz und 63 Hz; bei diesen tiefen Frequenzen konnten die Betriebszustände im Nahfeld registriert werden. Quelle: [14], dortige Abbildung 9, S. 24, Angaben hinzugefügt.



**Abbildung 4.9-2:** Immission: Darstellung der Pegel tiefer Frequenzen in Abhängigkeit der Terzfrequenz innerhalb eines Wohnhauses in 600 m Entfernung. Zwischen den Betriebszuständen „alle WEA an“ und dem Hintergrundgeräusch ist kein nennenswerter Unterschied zu erkennen. Die Hörschwellenkurve wird im Infraschallbereich deutlich unterschritten. Quelle: [14], dortige Abbildung 21, Seite 33



## BAYERN

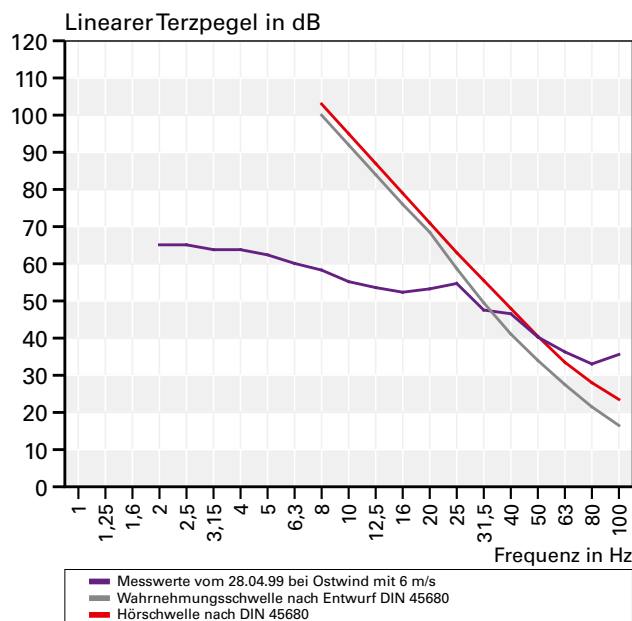
Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) führte in den Jahren 1998 bis 1999 eine Langzeit-Geräuschimmissionsmessung an einer 1-MW-Windkraftanlage Typ Nordex N54 in Wiggensbach bei Kempten durch. **Tabelle 4.9-1** und **Abbildung 4.9-3** stellen die wesentlichen Ergebnisse dar. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass „die im Infraschallbereich liegenden Schallemissionen der Windkraftanlage weit unter der Wahrnehmungsschwelle des Menschen liegen und daher zu keinen Belästigungen führen“. Außerdem wurde festgestellt, dass der durch den Wind verursachte Infraschall deutlich stärker ist als der ausschließlich vom Windrad erzeugte Infraschall [15] [16].

## DÄNEMARK

Eine dänische Studie von 2010 [17], in der Daten von fast 50 Windkraftanlagen mit Leistungen zwischen 80 kW und 3,6 MW ausgewertet wurden, kommt zu folgendem Ergebnis: „Windkraftanlagen (WKA) emittieren ganz gewiss Infraschall, aber die Pegel sind niedrig, wenn man die Empfindlichkeit des Menschen für solche Frequenzen in Betracht zieht. Selbst dicht an den WKA liegt der Schalldruckpegel weit unter der normalen Hörschwelle, und der Infraschall wird daher nicht als ein Problem angesehen für WKA derselben Konstruktion und Größe wie die untersuchten“ [15]. In der Studie werden weitere internationale Publikationen zum Thema zitiert.

## AUSTRALIEN

Die südaustralische Umweltschutzbehörde EPA – Environment Protection Authority South Australia – veröffentlichte 2013 zusammen mit dem Ingenieurbüro Resonate Acoustics die Studie „Infrasound levels near windfarms and in other environments“ [18]. In der Studie werden Messergebnisse vorgestellt, die sowohl außen als auch in Innenräumen ermittelt wurden. Die Messpunkte befanden sich



**Abbildung 4.9-3:** Das untersuchte Windrad erzeugt Schallwellen, die von auf einem Balkon in 250 m Entfernung stehenden Menschen nur oberhalb 40 Hz gehört werden können. Der Infraschallbereich ist hier nicht wahrnehmbar, da er deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt. Quelle: [15]

in der Nähe von Windparks und in Regionen ohne Windenergieanlagen.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die gemessenen Infraschall-Expositionen, die in der Nähe von Windfarmen in Wohnhäusern gemessen wurden, dem Bereich entsprechen, die in vergleichbaren Regionen ohne Windkraftanlagen ermittelt wurde. Die niedrigsten im Messprojekt festgestellten Infraschall-Pegel wurden in einem Haus registriert, das in der Nähe eines Windparks stand.

Die Infraschall-Pegel in der Nähe von Windkraftanlagen sind nicht höher als in anderen städtischen und ländlichen Regionen, in welchen der Beitrag von Windenergieanlagen vernachlässigbar ist, verglichen mit dem Hintergrundpegel des Infraschalls in der dortigen Umgebung.

**Tabelle 4.9-1:** Infraschallpegel im Abstand von 250 m zu einer 1-MW-Windkraftanlage bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Quelle: [15]

Windgeschwindigkeit		Linearer Terzpegel in dB bei einer Terzmittenfrequenz von				
		8 Hz	10 Hz	12,5 Hz	16 Hz	20 Hz
6 m/s	mäßige Brise, die gemessenen Geräusche stammen überwiegend von der Windkraftanlage	58	55	54	52	53
15 m/s	starker bis stürmischer Wind, die gemessenen Geräusche stammen überwiegend vom Wind	75	74	73	72	70

Zitat: „It is clear from the results that the infrasound levels measured at the two residential locations near wind farms (Location 8 near the Bluff Wind Farm and Location 9 near Clements Gap Wind Farm) are within the range of infrasound levels measured at comparable locations away from wind farms. Of particular note, the results at one of the houses near a wind farm (Location 8) are the lowest infrasound levels measured at any of the 11 locations included

in this study. This study concludes that the level of infrasound at houses near the wind turbines assessed is no greater than that experienced in other urban and rural environments, and that the contribution of wind turbines to the measured infrasound levels is insignificant in comparison with the background level of infrasound in the environment.“ [18]

## 4.10 Fazit der Messungen an Windenergieanlagen

- Die in der Umgebung von Windenergieanlagen gemessenen tieffrequenten Geräusche inkl. Infraschall setzen sich aus drei Anteilen zusammen: 1. Anlagengeräusche; 2. Geräusche, die durch den Wind in der Umgebung entstehen; 3. Geräusche, die am Mikrofon durch den Wind induziert werden. Der Wind ist stets als Störfaktor (Fremdgeräusch) bei der Ermittlung der Anlagengeräusche zu berücksichtigen. Die Messwerte unterliegen einer breiten Streuung.
- Der von Windenergieanlagen ausgehende Infraschall kann in der näheren Umgebung prinzipiell gut gemessen werden. Unterhalb von 8 Hz treten im Frequenzspektrum erwartungsgemäß diskrete Linien auf, welche auf die gleichförmige Bewegung der einzelnen Rotorblätter zurückzuführen sind.
- In 700 m Abstand von den Windenergieanlagen war zu beobachten, dass sich beim Einschalten der Anlagen der gemessene Infraschall-Pegel nicht mehr nennenswert oder nur in geringem Umfang erhöht. Der Infraschall wurde im Wesentlichen vom Wind erzeugt und nicht von den Windenergieanlagen.
- Die gemessenen Infraschall-Pegel (G-Pegel) lagen in rund 150 m Entfernung von den eingeschalteten Anlagen zwischen 55 und 80 dB(G), bei ausgeschalteten Anlagen zwischen 50 und 75 dB(G). In Entfernungen von 650 bis 700 m lagen die G-Pegel sowohl bei ein- als auch bei ausgeschalteter Anlage zwischen 55 und 75 dB(G). Ursache für die Streuung der Werte sind stark schwankende Geräuschanteile, die vom Wind hervorgerufen werden (**Tabelle 2-1**).
- Die Infraschallpegel in der Umgebung von Windkraftanlagen lagen bei den Messungen auch im Nahbereich bei Abständen zwischen 150 und 300 m deutlich unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle gemäß DIN 45680 (Entwurf 2013) [5] bzw. **Tabelle A3-1**.
- Die von der untersuchten Windkraftanlage ausgehenden Erschütterungen waren bereits in weniger als 300 m Abstand sehr gering. In Entfernungen, wie sie sich aus Gründen des Schallimmissionsschutzes ergeben, sind an Wohngebäuden keine Einwirkungen zu erwarten, die das überall vorhandene Grundrauschen übersteigen.
- Die Ergebnisse dieses Messprojekts stehen im Einklang mit Resultaten ähnlicher Untersuchungen auf nationaler und internationaler Ebene.

**Tabelle 4-11:** Zusammenfassende tabellarische Darstellung der ersten Messwerte (Infraschall und tieffrequente Geräusche) an Windkraftanlagen. Die Messwerte unterlagen häufig erheblichen Schwankungen und beinhalten stets auch die Windgeräusche. Da die Messungen mit schallharter Platte durchgeführt wurden, erfolgte eine Korrektur (vgl. Abschnitt 4.1).

Windenergieanlage	Kapitel	G-bewertete Pegel in dB(G)	Infraschall- Terzpegel $\leq 20$ Hz in dB *	Tieffrequente Terzpegel 25-80 Hz in dB *
		WEA an / aus	WEA an	WEA an
<b>WEA 1</b> – 700 m – 150 m	4.2	55-75 / 50-75 65-75 / 50-70	– 55-70	– 50-55
<b>WEA 2</b> – 240 m – 120 m	4.3	60-75 / 60-75 60-80 / 60-75	– 60-75	– 50-55
<b>WEA 3</b> – 300 m – 180 m	4.4	55-80 / 50-75 55-75 / 50-75	– 50-70	– 45-50
<b>WEA 4</b> – 650 m – 180 m	4.5	50-65 / 50-65 55-65 / 50-65	– 45-55	– 40-45
<b>WEA 5</b> – 650 m – 185 m	4.6	60-70 / 55-65 60-70 / 55-65	– 50-65	– 45-50
<b>WEA 6</b> – 705 m – 192 m	4.7	55-65 / 55-60 60-75 / 55-65	– 55-65	– 45-50

\* Lineare Terzpegel in dB(Z)

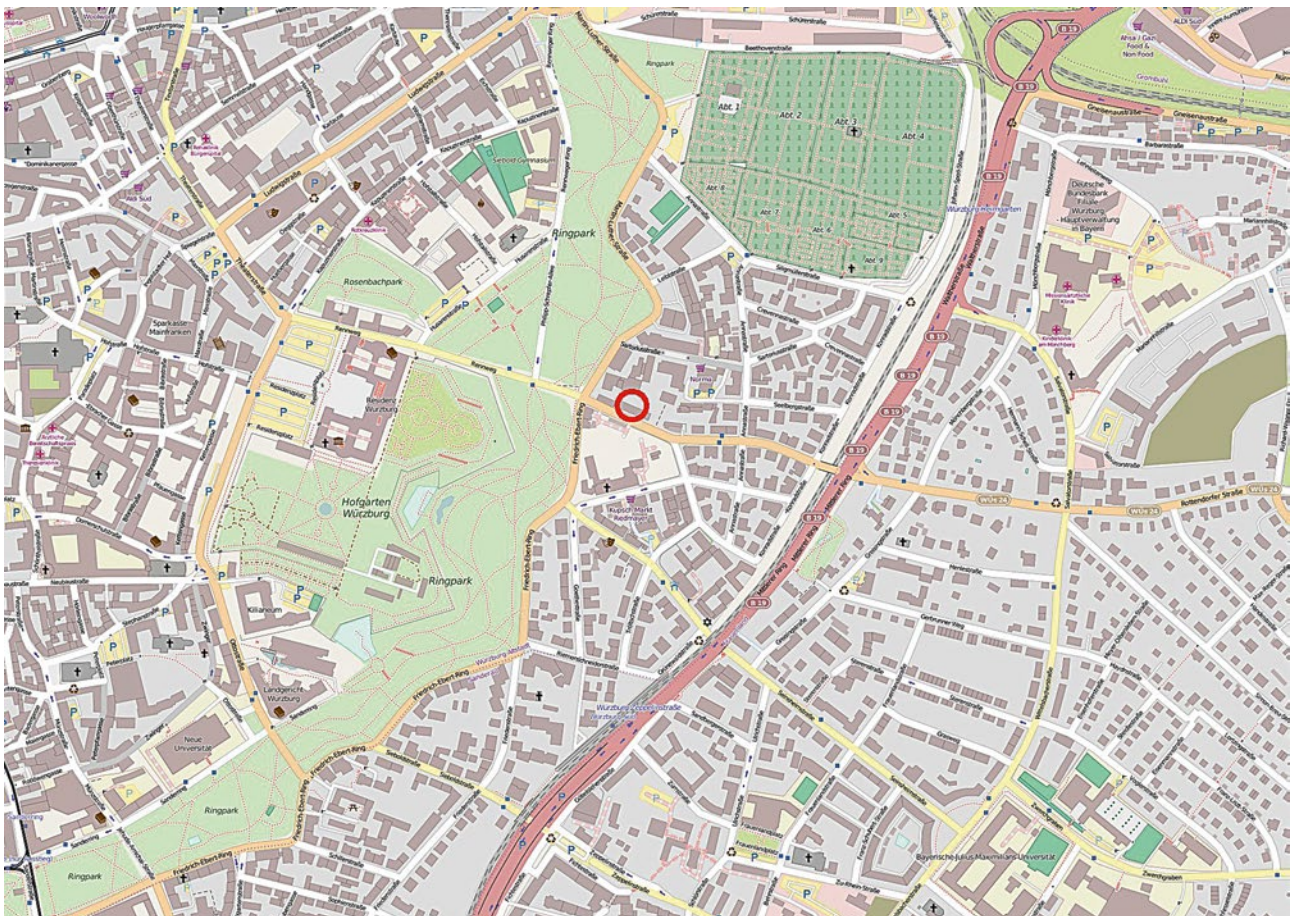


## 5 Straßenverkehr

Im Rahmen des Messprojektes sollten neben den Windkraftanlagen auch noch andere Quellen tieffrequenter Geräusche inkl. Infraschall untersucht werden. Naheliegender war es dabei, den nahezu ubiquitär verbreiteten Straßenverkehr zu betrachten. Dazu wurde eine Messung an einer Straße in Würzburg vorgenommen (durch Fa. Wölfel) sowie an der Bundesautobahn A5 südlich von Karlsruhe (durch LUBW). Außerdem wurden Daten der innerstädtischen Verkehrslärm-Dauermessstationen der LUBW in Karlsruhe und Reutlingen herangezogen, um die erfassten Daten im Hinblick auf tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall auszuwerten. Die Bedingungen wurden so gewählt, dass weder Windgeräusche in der Umgebung noch windinduzierte Geräusche an den Mikrofonen auftraten, die bei den Messungen an den Windkraftanlagen Probleme bereiten (siehe Abschnitt 4). Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind daher ursächlich auf den Straßenverkehr zurückzuführen.

### 5.1 Innerstädtische Straßen – Messung Würzburg

Am Immissionsort Rottendorfer Straße in Würzburg war es möglich, die Schallpegelmessungen mit speziellem Fokus auf tieffrequente Geräusche und Infraschall sowohl innerhalb als auch außerhalb einer Wohnung durchzuführen. Der Messort befindet sich überwiegend im direkten Einwirkungsbereich der Rottendorfer Straße, zusätzlich aber auch noch im Bereich der etwa 300 m entfernten Bundesstraße B 19, die von Bad Mergentheim nach Würzburg führt, sowie der Eisenbahnlinie Würzburg-Lauda (**Abbildung 5.1-1**). Am Immissionsort dominieren jedoch die Geräusche des Straßenverkehrs auf der Rottendorfer Straße (**Abbildung 5.1-2**) mit einer durchschnittlichen Verkehrsstärke von 13 971 Kfz/24 h bei einem Schwerverkehrsanteil von ca. 3 % (Daten der Verkehrserhebung aus dem Jahr 2012).



**Abbildung 5.1-1:** Lageplan mit Eintrag des Immissionsorts Rottendorfer Straße, Würzburg. Quelle: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)





**Abbildung 5.1-2 a/b:** Blick in die Rottendorfer Straße in Würzburg. Foto: Fa. Wölfel

Es wurde bewusst eine Situation ausgewählt, wie sie sich vielerorts wiederfindet. Bei Messorten mit sehr hohen Verkehrszahlen und damit assoziierten Verkehrsräuschen steht der hörbare Geräuschpegel im Vordergrund; bereits hierdurch kommt es zu Belästigungssituationen und ggf. schädlichen Umwelteinwirkungen. Die vom Straßenverkehr ausgehenden tieffrequenten Geräusche inkl. ihres Infrashallanteils konnten ohne störende Windgeräusche gemessen werden. Die gemessenen Pegel sind charakteristisch für die Geräuschsituation an der Wohnbebauung.

Jeweils an einem Messpunkt im Freien und innerhalb einer Wohnung wurden die Schalldruckpegel bis zu einer unteren Grenzfrequenz von 1 Hz erfasst. Zur Bewertung der tieffrequenten Einwirkungen wurden für den Messort innerhalb des Gebäudes Auswertungen nach DIN 45680 (Entwurf 2013) [5] vorgenommen.

Die Durchführung der Messung erfolgte an zwei Messorten. Messpunkt MP1 wurde in Anlehnung an DIN 45645 (1996) [8] gewählt, und zwar analog zu den Messungen an den WEA mit schallharter Platte auf dem Boden des Balkons Richtung Straße. Ein zweiter Messpunkt MP2 wurde

gemäß DIN 45680 (März 1997) [4] innerhalb der Wohnung platziert. Die Messung wurde als beobachtete Messung durchgeführt. Die voll möblierte und bewohnte Wohnung wurde während des Messzeitraums nicht benutzt. Die Abmessungen des Raumes betrugen ca. 7,6 m x 4,3 m x 2,5 m. Informativ wurde an einem dritten Messpunkt direkt an der Fassade auf Höhe der Fenster eine Vergleichsmessung durchgeführt. Die Terzpegel an der Fassade liegen im Bereich unterhalb von 25 Hz zwischen 0 und 3 dB unter den Terzpegeln auf dem Boden des Balkons. Im Bereich zwischen 25 Hz und 80 Hz liegen die Terzpegel direkt an der Fassade um bis zu 6 dB unter den Terzpegeln auf dem Boden des Balkons. Im Frequenzbereich oberhalb 100 Hz dagegen liegen sie um 0 bis 3 dB über den Terzpegeln auf dem Boden des Balkons. An den hier präsentierten Messdaten für den Boden des Balkons wurden keine Pegelkorrekturen analog Abschnitt 4.1 durchgeführt.

Der Messzeitraum erstreckte sich von Donnerstagnachmittag, 04.07.2013 um 15.00 Uhr, bis in den frühen Morgen des darauffolgenden Freitags, 05.07.2013 um 6.00 Uhr. Der Messzeitraum lag außerhalb der Schulferien und ist repräsentativ für die Belastung des Immissionsorts an einem



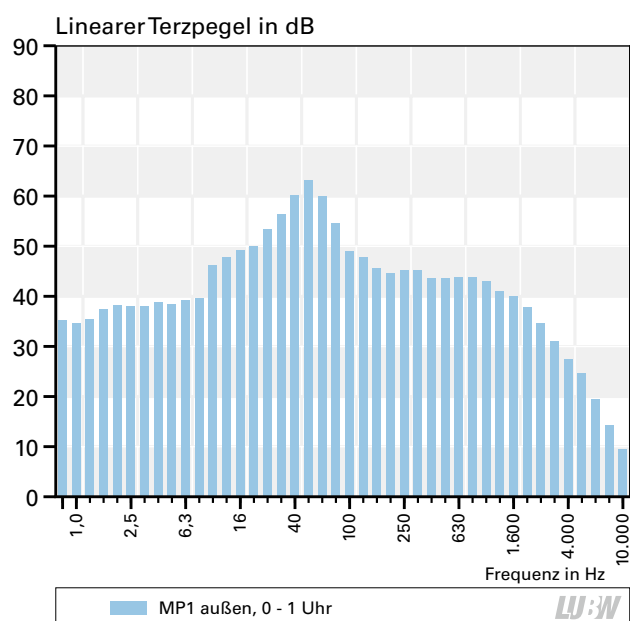
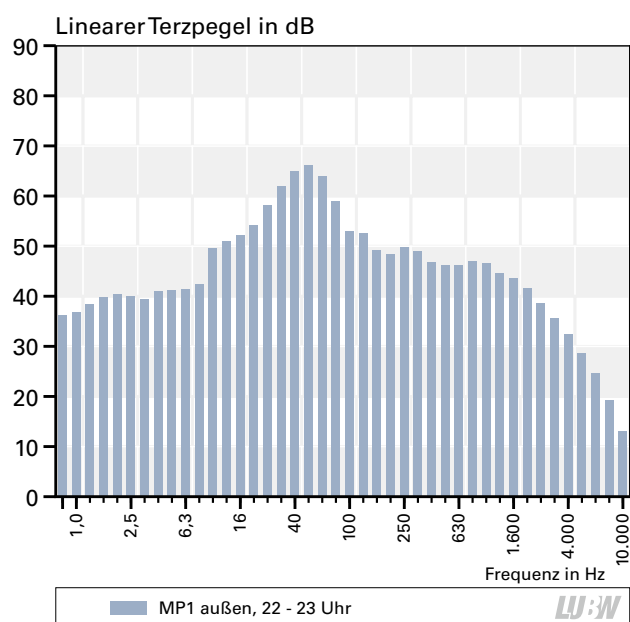
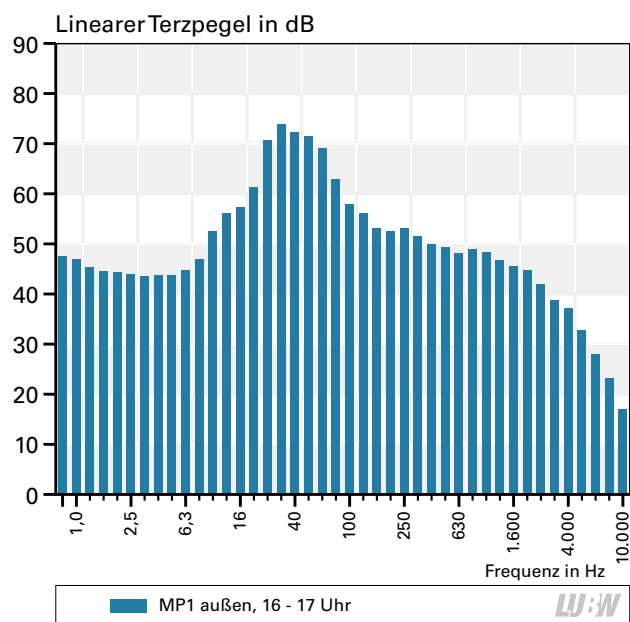
Werktag. Das Verkehrsaufkommen wird als vergleichbar zu den Daten der Verkehrserhebung eingeschätzt. Bei der Ermittlung der Verkehrsgläusche wurden die Zeiträume mit erheblicher Fremdgeräuscheinwirkung (z. B. Fluggeräusche, Tiergeräusche und Störgeräusche des Messingenieurs) markiert und von der Auswertung ausgeschlossen. Die Messung erfolgte in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 0 bis 4 m/s (im Mittel 0,5 m/s), einem Temperaturbereich von 16,3 bis 22,5 °C und einem Luftdruckbereich von 999 bis 1 003 hPa.

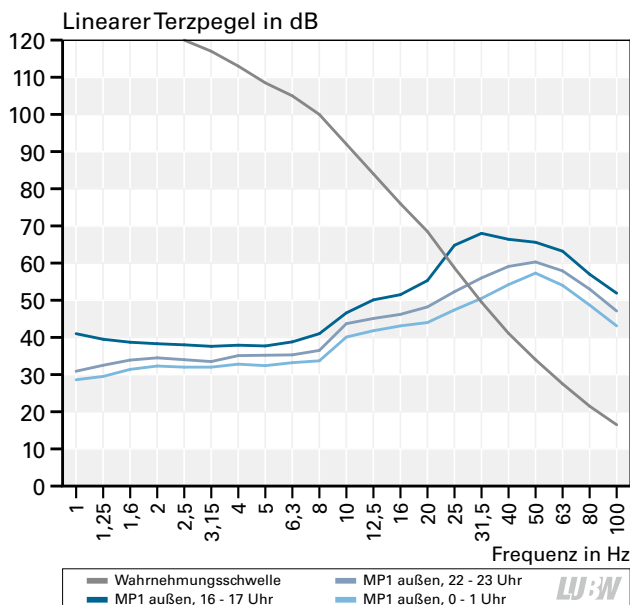
## ERGEBNISSE AUSSENMESSPUNKT

Beispielhaft sind in **Abbildung 5.1-3** für den Messpunkt MP1 (außerhalb des Gebäudes) Terzspektren für die Zeiträume 16 - 17 Uhr, 22 - 23 Uhr und 0 - 1 Uhr dargestellt. Die Außenpegel lagen tags im tieffrequenten Bereich bis 100 Hz oberhalb der Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle. In den Terzspektren ist eine deutliche Überhöhung im Frequenzbereich 25 Hz bis 80 Hz zu erkennen, welche auf den Fahrzeugverkehr zurückzuführen ist. Im Bereich 25 Hz bis 63 Hz liegen die Pegel über 70 dB, teilweise bis 75 dB. Nachts werden Werte bis 65 dB erreicht. Für den Infraschall bis 20 Hz lagen die Außenpegel tags unterhalb der Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle zwischen 45 und 65 dB. Die angegebenen Frequenzen bezeichnen jeweils die Terzmittenfrequenz.

**Abbildung 5.1-4** zeigt die über eine Stunde gemittelten linearen Terzpegel für den tieffrequenten Bereich unterhalb 100 Hz im Vergleich zur Wahrnehmungsschwelle nach DIN 45680 (Entwurf 2013) [5], für Werte unterhalb 8 Hz wurde diese ergänzt [11], siehe auch **Tabelle A3-1**. Gut erkennbar ist die Korrelation der Werte mit dem Verkehrsgeschehen: Der stärkere Straßenverkehr zwischen 16 Uhr und 17 Uhr führt sowohl im Infraschallbereich als auch im übrigen tieffrequenten Bereich zu höheren Werten. Je nach Verkehrsstärke wird die Wahrnehmungsschwelle zwischen 20 Hz und 32 Hz (Terzmittenfrequenz) überschritten.

**Abbildung 5.1-3:** Lineare Terzspektren für die Zeitabschnitte 16 - 17 Uhr (oben), 22 - 23 Uhr (Mitte) und 0 - 1 Uhr (unten) am Außenmesspunkt MP1. In den Spektren ist eine deutliche Überhöhung im Frequenzbereich 25 Hz bis 80 Hz zu erkennen, was auf den Fahrzeugverkehr zurückzuführen ist.





**Abbildung 5.1-4:** Vergleich der korrigierten linearen Terzpegel, ermittelt am Messpunkt MP1 (außerhalb des Gebäudes) für die Mittelungszeiträume 16 - 17 Uhr, 22 - 23 Uhr und 0 - 1 Uhr. Angegeben ist außerdem die Wahrnehmungsschwelle (siehe Abschnitt 4.1).

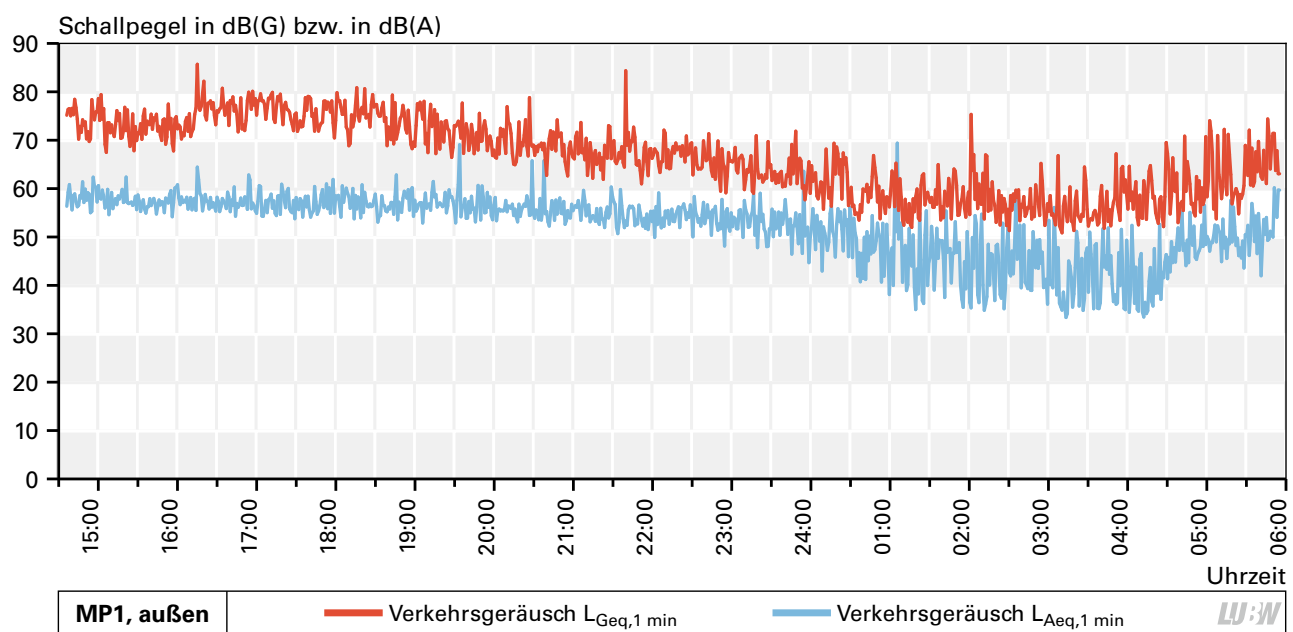
Die während des gesamten Messzeitraums aufgezeichneten A- und G- bewerteten Summenpegel  $L_{Aeq(t)}$  und  $L_{Geq(t)}$  zeigt **Abbildung 5.1-5**. Während die A-Bewertung den Hörschall als Einzahlwert wiedergibt, liegt der Bewertungsschwerpunkt des G-Pegels im Infraschall. Die Kurven zeigen einerseits eine deutliche Bandbreite, die durch die Schwankungen der Geräuscheinwirkungen entsteht. Diese

Schwankungen sind beim G-Pegel geringer ausgeprägt. Gut erkennbar ist auch die Analogie des Verlaufes von A- und G-Pegel. Beide Pegel gehen in den Nachtstunden – bei geringem Verkehr – deutlich zurück. Der G-Pegel erreicht tagsüber Werte bis 80 dB(G) und nachts Minimalwerte um 55 dB(G), mit starken Schwankungen.

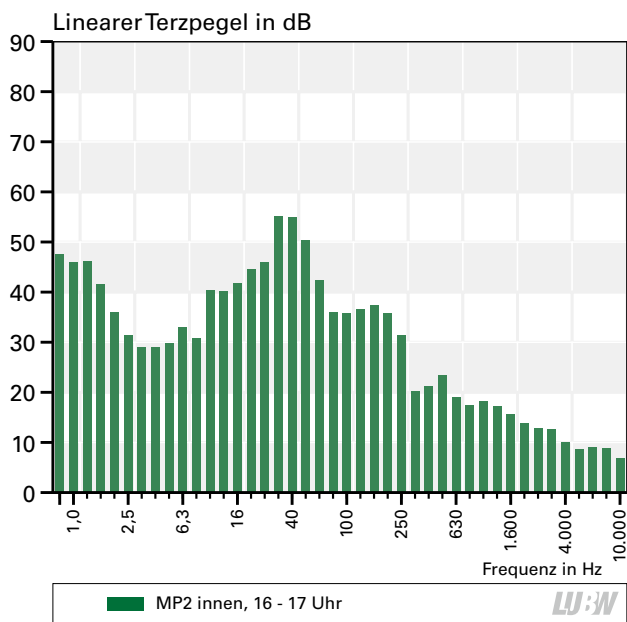
#### ERGEBNISSE INNENMESSPUNKT

In **Abbildung 5.1-6** sind für den Messpunkt MP2 innerhalb des Gebäudes Terzspektren für die Zeiträume 16 - 17 Uhr, 22 - 23 Uhr und 0 - 1 Uhr dargestellt. Die Innenpegel liegen für den Infraschall bis 20 Hz Tag und Nacht unterhalb Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle (< 55 dB). Oberhalb von 32 Hz bis 40 Hz (Terzmittenfrequenz) liegen die Werte der linearen Terzpegel oberhalb der Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle (bis 55 dB). In Schmalbandspektren (hier nicht abgebildet) waren eine Anzahl diskreter, hervortretender Maxima zu detektieren, die auf Eigenfrequenzen des Raumes und auf angeregte Eigenfrequenzen des Gebäudes zurückzuführen waren.

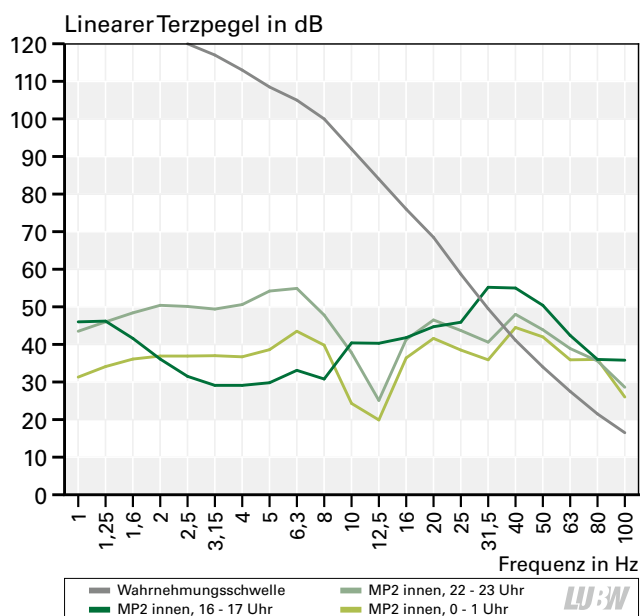
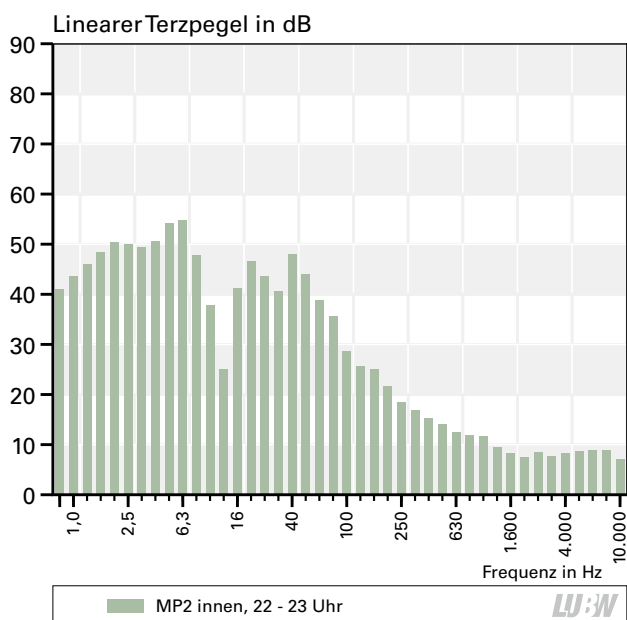
**Abbildung 5.1-7** zeigt die über eine Stunde gemittelten linearen Terzpegel für den tieffrequenten Bereich unterhalb 100 Hz im Vergleich zur Wahrnehmungsschwelle nach Entwurf DIN 45680 [5], für Werte unterhalb 8 Hz wurde diese ergänzt [11]. Generell ist auch hier ein Rückgang der



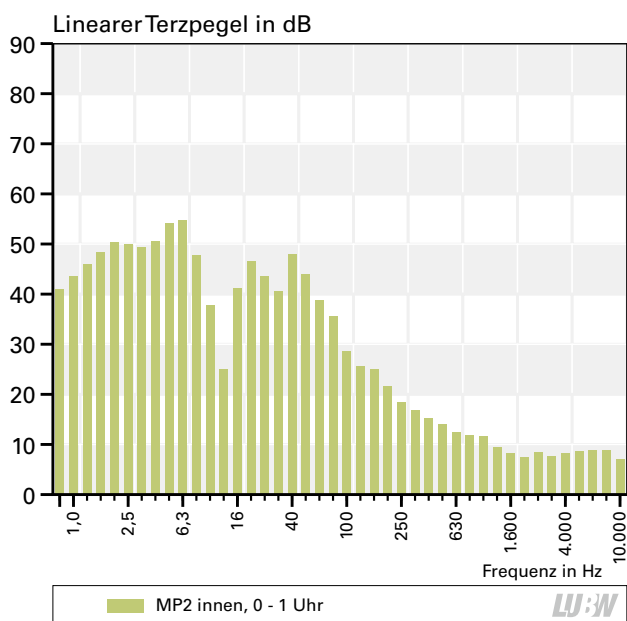
**Abbildung 5.1-5:** Verlauf des A-bewerteten Summenpegels  $L_{Aeq(t)}$  (blau) und des G-bewerteten Summenpegels  $L_{Geq(t)}$  (rot) über den gesamten Messzeitraum am Außenmesspunkt MP1



Pegel mit fortschreitenden Nachtstunden erkennbar. Warum die Infraschallpegel zwischen 2 Hz und 8 Hz in der Nacht höher liegen, ist unklar. Der G-bewertete Pegel lag im Zeitverlauf zwischen 40 dB(G) in der Nacht und 65 dB(G) am Tag.



**Abbildung 5.1-7 (oben):** Vergleich der Terzpegel am Messpunkt MP2 (innerhalb der Wohnung) für die Mittelungszeiträume 16 - 17 Uhr, 22 - 23 Uhr und 0 - 1 Uhr. Angegeben ist außerdem die Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1.



**Abbildung 5.1-6 (linke Spalte):** Lineare Terzspektren für die Zeitabschnitte 16 - 17 Uhr (oben), 22 - 23 Uhr (Mitte) und 0 - 1 Uhr (unten) am Innenmesspunkt MP2.

## 5.2 Innerstädtische Straßen – Dauermessstationen Karlsruhe und Reutlingen

Die LUBW betreibt seit November 2012 eine stationäre Straßenverkehrslärm-Messstation in Karlsruhe (Reinhold-Frank-Straße) und seit März 2013 eine weitere in Reutlingen (Lederstraße-Ost). Mit hochwertigen Schallpegelmessgeräten werden dabei Mittelungs- und Maximalpegel des Gesamtgeräuschs erfasst, ferner die meteorologischen Parameter Temperatur, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Außerdem werden die Verkehrsdaten (Fahrzeugart, Anzahl und Geschwindigkeit) aufgezeichnet. An beiden Station ist ein relativ hohes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen: In Karlsruhe sind es ca. 24 000 Kfz/24h, allerdings bei einem zeitweisen Stillstand des Verkehrs, in Reutlingen rund 50 000 Kfz/24h (Stand 2011).

In Karlsruhe befindet sich das Mikrofon in unmittelbarer Nähe zur Fahrbahn, sodass die ermittelten Pegel nicht direkt die Betroffenheit der etwas weiter entfernt wohnenden Bevölkerung wiedergibt. Der Abstand zur Wohnbebauung beträgt weniger als 10 m (**Abbildung 5.2-1**). Die Lage der Messstation in Reutlingen erlaubt unmittelbar Aussagen zur Lärmbelastung der betroffenen Menschen (**Abbildung 5.2-2**). Weitere Informationen sind im Internet unter der Adresse [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/222745](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/222745) zu finden (Einstiegsseite). Unter der Rubrik „Auswertungen“ finden sich auch die Jahresberichte der LUBW zu den Verkehrslärmmessstationen.

Auf Grundlage der Messdaten der Straßenverkehrslärm-messstationen Karlsruhe und Reutlingen wurden von uns Auswertungen im Hinblick auf tieffrequente Geräusche (inkl. Infraschall) vorgenommen. In den folgenden **Abbildungen 5.2-3 und 5.2-4** finden sich für die beiden Stationen frequenzselektive Darstellungen der Geräuschpegel von 6,3 Hz bis 125 Hz (Terzmittenfrequenz). Es wurden Mittelungen über jeweils 30 Minuten vorgenommen und zusammengefasst. Dabei wurden ausschließlich solche Zeitabschnitte berücksichtigt, bei welchen die Windgeschwindigkeiten unter einem Meter pro Sekunde lagen, dies waren rund 2 000 Halbstunden-Mittelwerte für Karlsruhe und ca. 1 900 für Reutlingen, darunter sehr viele Nachtstunden. Dadurch war gewährleistet, dass einerseits keine in der Umgebung von Wind verursachten Geräusche



**Abbildung 5.2-1:** Messstation der LUBW zur Erfassung von Straßenverkehrslärm in Karlsruhe, Reinhold-Frank-Straße. Der Pfeil zeigt die Lage des Mikrofons, im Hintergrund Wohnbebauung. Foto: LUBW



**Abbildung 5.2-2:** Messstation der LUBW zur Erfassung von Straßenverkehrslärm in Reutlingen, Lederstraße. Der Pfeil zeigt die Lage des Mikrofons. Foto: LUBW



auftraten und mitgemessen wurden und andererseits auch kein vom Wind induzierter Schall direkt am Mikrofon auftrat. Beide Effekte hätten, wie bei den Messungen an den Windenergieanlagen, zu einer Erhöhung der Pegelwerte im tieffrequenten Bereich und Infraschall geführt.

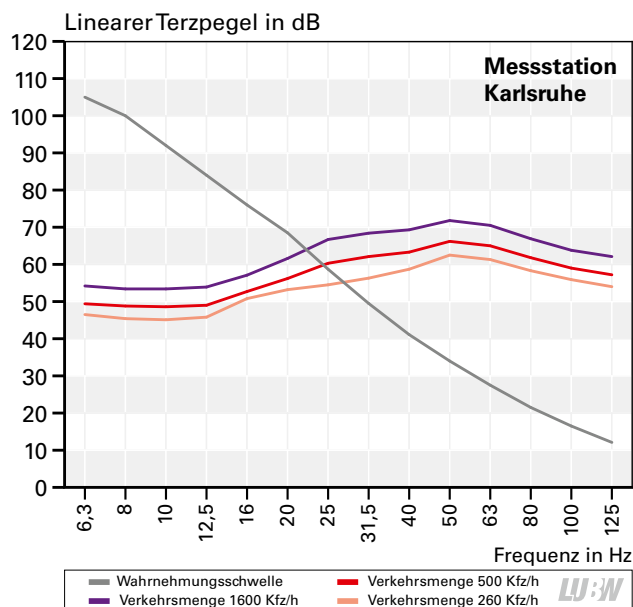
Um den Einfluss der Verkehrsstärke aufzuzeigen, sind neben der Darstellung für eine mittlere Verkehrsmenge auch Darstellungen für größere und niedrigere Verkehrsmengen aufgenommen worden (die genauen Daten ergeben die aus der Legende der **Abbildung 5.2-3 und 5.2-4**). Der Schwerlastanteil, bezogen auf die ausgewerteten Gesamtdaten, betrug in Karlsruhe 5 % und in Reutlingen 11 %.

Beide Auswertungen zeigen zwischen 31,5 Hz und 80 Hz oberhalb der Wahrnehmungsschwelle eine auffällige Überhöhung, die auf den Kfz-Verkehr zurückzuführen ist. Je nach Verkehrsstärke werden mittlere Werte bis 72 dB (Karlsruhe) bzw. 75 dB (Reutlingen) erreicht. Im Infraschallbereich (unterhalb 20 Hz) und darunter unterscheiden sich die Messergebnisse: In Karlsruhe werden hier niedrigere Werte gemessen als in Reutlingen, was auf unterschiedliche Schwerlastanteile, Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten zurückzuführen sein dürfte. Die Terzpegel

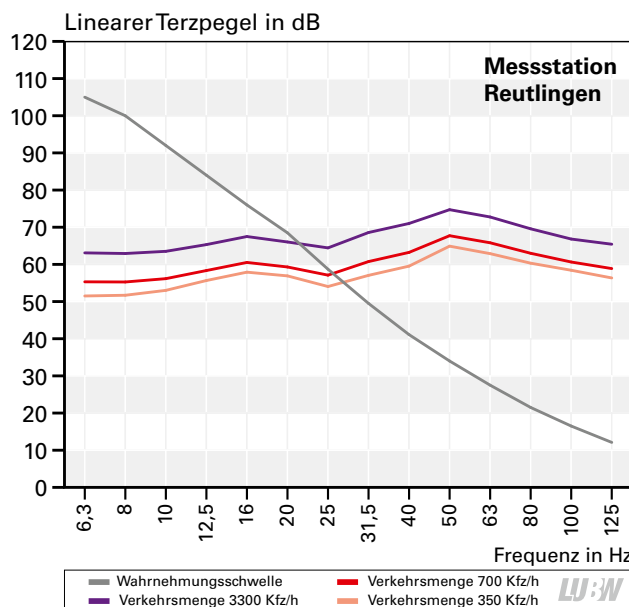
überschreiten in beiden Fällen bei höherem Verkehrsaufkommen bereits zwischen der 20 Hz- und 25 Hz-Terz die Wahrnehmungsschwelle. Ein analoges Ergebnis lag bei der Straßenmessung in Würzburg vor (Abschnitt 5.1, **Abbildung 5.1-4**). Die G-bewerteten Schallpegel lagen in Karlsruhe zwischen 65 und 75 dB(G) und in Reutlingen zwischen 70 und 80 dB(G), siehe **Tabelle 5.2-1**.

### 5.3 Autobahn – Messung bei Malsch

Die LUBW führte am 26.06.2013 tagsüber zwischen 13.00 Uhr und 15.00 Uhr Schallmessungen an der Bundesautobahn A5 (E52) südlich von Karlsruhe in Höhe der Ortschaft Malsch durch. Das Wetter war sonnig und praktisch windstill. Durch Wind induzierte Störgeräusche am Mikrofon sind daher auszuschließen. Die Abstände der Mikrofonpositionen zur Mitte des Mittelstreifens der Autobahn lagen bei 80 m, 260 m und 500 m (**Abbildung 5.3-1**). Die Messwerte am Messpunkt in 500 m Entfernung mussten später aufgrund von Einstreuungen der Bundesstraße B3 und weiterer Störgeräusche verworfen werden. Angaben zur verwendeten Messtechnik finden sich im Anhang A4.



**Abbildung 5.2-3:** Terzspektren Messstation Karlsruhe



**Abbildung 5.2-4:** Terzspektren Messstation Reutlingen

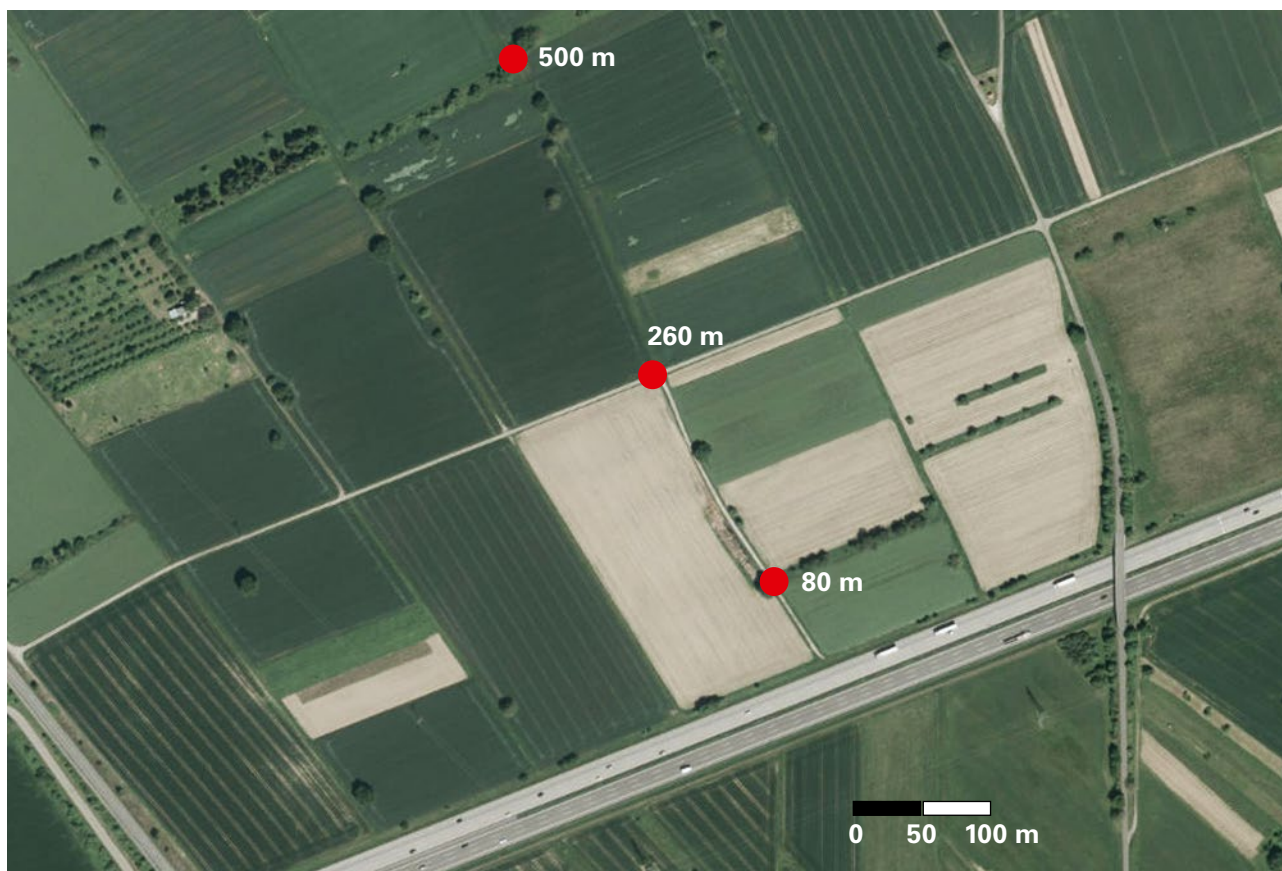
Ausgewertet wurden Zeiträume mit Windstille bzw. Windgeschwindigkeiten unterhalb 1 m/s im Jahr 2013. Dabei wurden Mittelungen über jeweils 30 min gebildet und zusammengefasst. Die Überhöhung im Bereich zwischen den Terzen 31,5 Hz und 80 Hz wird vom Straßenverkehr verursacht. Die Kurven zeigen die Unterschiede bei verschiedenen Verkehrsstärken. Hinweis: Die Darstellung beginnt ab einer Frequenz von 6,3 Hz (in anderen Abbildungen z. T. ab 1 Hz); dies ist auf die eingesetzte Messtechnik zurückzuführen. Zum Vergleich ist die Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 dargestellt.

**Tabelle 5.2-1:** Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse für tieffrequente Geräusche (inkl. Teile des Infraschalls) an den Verkehrslärmmessstationen Reutlingen und Karlsruhe

Quelle/Situation	G-bewertete Pegel in dB(G)	Infraschall- Terzpegel ≤ 20 Hz in dB *	Tieffrequente Terzpegel 25-80 Hz in dB *
Verkehrslärmmessstation Karlsruhe Verkehrsmenge > 1600 Kfz/h	75	53 bis 62	67 bis 72
Verkehrslärmmessstation Karlsruhe mittlere Verkehrsmenge: 500 Kfz/h	65	48 bis 57	60 bis 67
Verkehrslärmmessstation Karlsruhe Verkehrsmenge < 260 Kfz/h	69	45 bis 54	55 bis 63
Verkehrslärmmessstation Reutlingen Verkehrsmenge > 3300 Kfz/h	80	63 bis 68	64 bis 75
Verkehrslärmmessstation Reutlingen mittlere Verkehrsmenge: 700 Kfz/h	70	55 bis 61	57 bis 68
Verkehrslärmmessstation Reutlingen Verkehrsmenge < 350 Kfz/h	73	52 bis 57	54 bis 61

\* Lineare Terzpegel in dB(Z)

LUBW



**Abbildung 5.3-1:** Lage der Messpunkte an der Bundesautobahn A5 südlich von Karlsruhe bei Malsch, mit Angabe der Abstände der Mikrofonpositionen zur Autobahnmitte. Die Gemeinde Malsch befindet sich außerhalb des Bildes links unten. Oberhalb des Bildausschnittes verläuft die Bundesstraße B3. Bildquelle: LUBW, LGL



Die Messergebnisse für die Abstände in 80 m und 260 m sind in **Abbildung 5.3-2** als Terzdarstellung grafisch dargestellt. Die Terzpegel im Infraschallbereich bewegen sich bei Werten um 60 dB und etwas darunter. Im tieffrequenten Bereich, etwa zwischen 40 Hz und 80 Hz, ist eine leichte Überhöhung auszumachen. Hier liegen die Messwerte deutlich oberhalb der Hörschwelle. Die mittlere Verkehrsstärke liegt bei rund 3 000 Kfz/h bei einem Schwerverkehrsanteil von rund 15 %. Die G-bewerteten Infraschallpegel lagen bei rund 75 dB(G) in 80 m Entfernung und rund 71 dB(G) in 260 m Entfernung. Weitere Erläuterungen zum G-Pegel finden sich im Anhang A3.

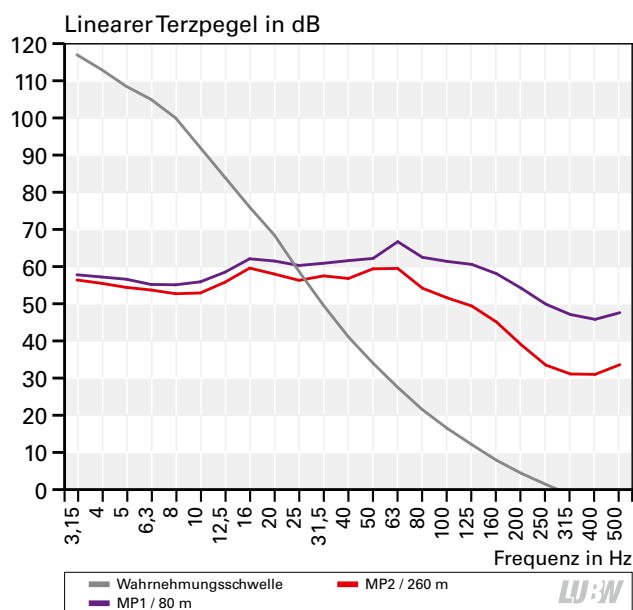
## 5.4 Innengeräusche Pkw während der Fahrt

Im Folgenden werden Ergebnisse von Geräuschmessungen der LUBW im Innern eines fahrenden Pkw und eines Kleinbusses dargestellt, die am 06.09.2012 durchgeführt wurden. Es handelt sich hierbei zwar um keinen in der Umgebung auftretenden Schall, also keinen Umgebungslärm bzw. Umweltlärm im engeren Sinne. Jedoch sind sehr viele Menschen diesen Geräuschen häufig und auch längere Zeit ausgesetzt, so dass es sicherlich sinnvoll ist, solche Mess-

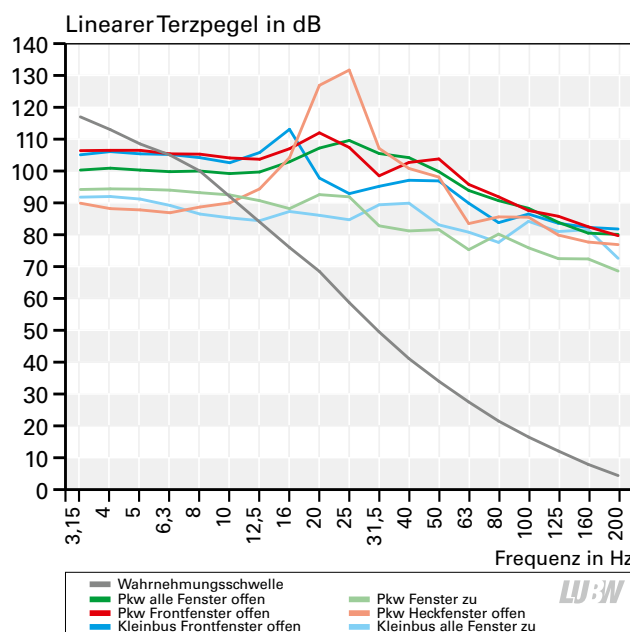
werte hier mit aufzunehmen. Es zeigte sich, dass hierbei relativ hohe Pegel sowohl im Infraschallbereich bis 20 Hz als auch im weiteren tieffrequenten Frequenzbereich oberhalb 20 Hz auftreten (**Abbildung 5.4, Tabelle 5.4**). Zu beachten ist dabei, dass bei offenen Fenstern so hohe Pegel im Bereich tiefer Frequenzen inkl. Infraschall entstehen, dass dies subjektiv als schmerzhaft empfunden wird. Die von uns gemessenen Werte stehen in Einklang mit entsprechenden Angaben in der Literatur (z. B. [19] [20]).

## 5.5 Fazit der Straßenverkehrsmessungen

- Die vom Straßenverkehr ausgehenden tieffrequenten Geräusche inkl. Infraschall konnten ohne störende Windgeräusche gemessen werden. Anders als bei Windenergieanlagen treten die erfassten Pegel unmittelbar dort auf, wo sich angrenzend Wohnbebauung befindet.
- Erwartungsgemäß konnte beobachtet werden, dass die Pegel der tieffrequenten Geräusche inkl. Infraschall nachts absanken. Auch eine gute Korrelationen mit der Verkehrsstärke war feststellbar: Je mehr Verkehr, desto höher sind die Schallpegel der tieffrequenten Geräusche inkl. Infraschall.



**Abbildung 5.3-2:** Frequenzabhängige Darstellung (lineare Terzpegel) einer Messung an der Bundesautobahn A5. Als Vergleich wurde die Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 mit aufgenommen. Hinweis: Die Darstellung beginnt ab einer Frequenz von 3,15 Hz (in anderen Abbildungen z. T. ab 1 Hz oder 6,3 Hz), dies ist auf die jeweils eingesetzte Messtechnik zurückzuführen.



**Abbildung 5.4:** Tieffrequenter Schall (Mittelungspegel) im Innern eines mit ca. 130 km/h fahrenden Pkw und Kleinbus im Vergleich zur Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1

**Tabelle 5.4:** Infraschallpegel im Innern eines Pkw bzw. Kleinbusses während der Fahrt mit 130 km/h

Quelle	G-bewertete Pegel in dB(G)	Infraschall-Terzpegel zwischen 3,2 und 20 Hz in dB *
Innengeräusch Pkw, alle Fenster geschlossen	105	88 bis 94
Innengeräusch Pkw, Heckfenster offen	139	87 bis 127
Innengeräusch Kleinbus, alle Fenster geschlossen	100	85 bis 93
Innengeräusch Kleinbus, Seitenfenster vorn offen	122	98 bis 113

\* Lineare Terzpegel in dB(Z)

LUBW

- Die Infraschallpegel des Straßenverkehrs erreichen in Bezug auf nahe gelegene Wohnbebauung in einzelnen Terzen maximal 70 dB (unbewertet), der G-bewertete Pegel liegt im Bereich zwischen 55 und 80 dB(G). Dies entspricht in etwa Literaturwerten für Meeresbrandung (**Tabelle 2-1**).
- Beim Straßenverkehr konnten in den Frequenzspektren erhöhte Pegelwerte im Bereich zwischen etwa 30 und 80 Hz festgestellt werden. Tieffrequente Geräusche in diesem Bereich liegen deutlich oberhalb der Hörschwelle und scheinen daher für eine Bewertung relevanter zu sein als die Infraschallpegel bis 20 Hz. Die Werte in diesem tieffrequenten Frequenzbereich liegen bei den betrachteten Situationen des Straßenverkehrs signifikant höher als in der Umgebung von Windenergieanlagen (**Tabelle 2-1**).
- Die höchsten Pegel wurden im Rahmen des Messprojektes innerhalb eines mit 130 km/h fahrenden Pkw gemessen. Hierbei handelt es sich zwar nicht um Immissionspegel, die in der freien Umgebung auftreten, jedoch um eine Alltagssituation der viele Menschen immer wieder und auch längere Zeit ausgesetzt sind. Die gemessenen Werte liegen sowohl im Infraschallbereich als auch im weiteren tieffrequenten Bereich um mehrere Größenordnungen über den ansonsten im Straßenverkehr oder an den Windenergieanlagen gemessenen Werten.

## 6 Städtischer Hintergrund

Für die Messung von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen am Tage und in der Nacht im städtischen Hintergrund wurde der Friedrichsplatz in Karlsruhe gewählt. Er befindet sich im Herzen der Stadt. Der Friedrichsplatz ist ein eher ruhiger Platz, direkt am Naturkundemuseum gelegen. Aufgestellte Bänke, angelegte Blumenbeete und ein Springbrunnen laden zum Verweilen und für kurze Pausen ein (**Abbildung 6-1**). Der Platz hat eine Ausdehnung von etwa 125 m in Nord-Süd-Richtung und 100 m in Ost-West-Richtung. Die Erbprinzenstraße kreuzt als Fahrradstraße den Friedrichsplatz. Westlich und östlich verlaufen Ritter- bzw. Lammstraße mit sehr langsam fahrendem Verkehr. Im Süden wird der Platz vom Naturkundemuseum Karlsruhe begrenzt. Westlich liegt die Kirche St. Stephan mit Vorplatz. Ansonsten ist der Friedrichsplatz mit Büro- und Geschäftshäusern umgeben, es finden sich auch einzelne Wohnungen. Die nächste stärker befahrene Straße liegt ca. 250 m südlich, abgeschirmt hinter dem Naturkundemuse-

um und dem Nymphengarten (Kriegstraße, B 10). Mehrere hundert Meter entfernt befinden sich hinter z. T. mehreren Gebäudeblöcken Straßenbahnlinien (**Abbildung 6-2**) und in nordwestlicher Richtung eine Baustelle.

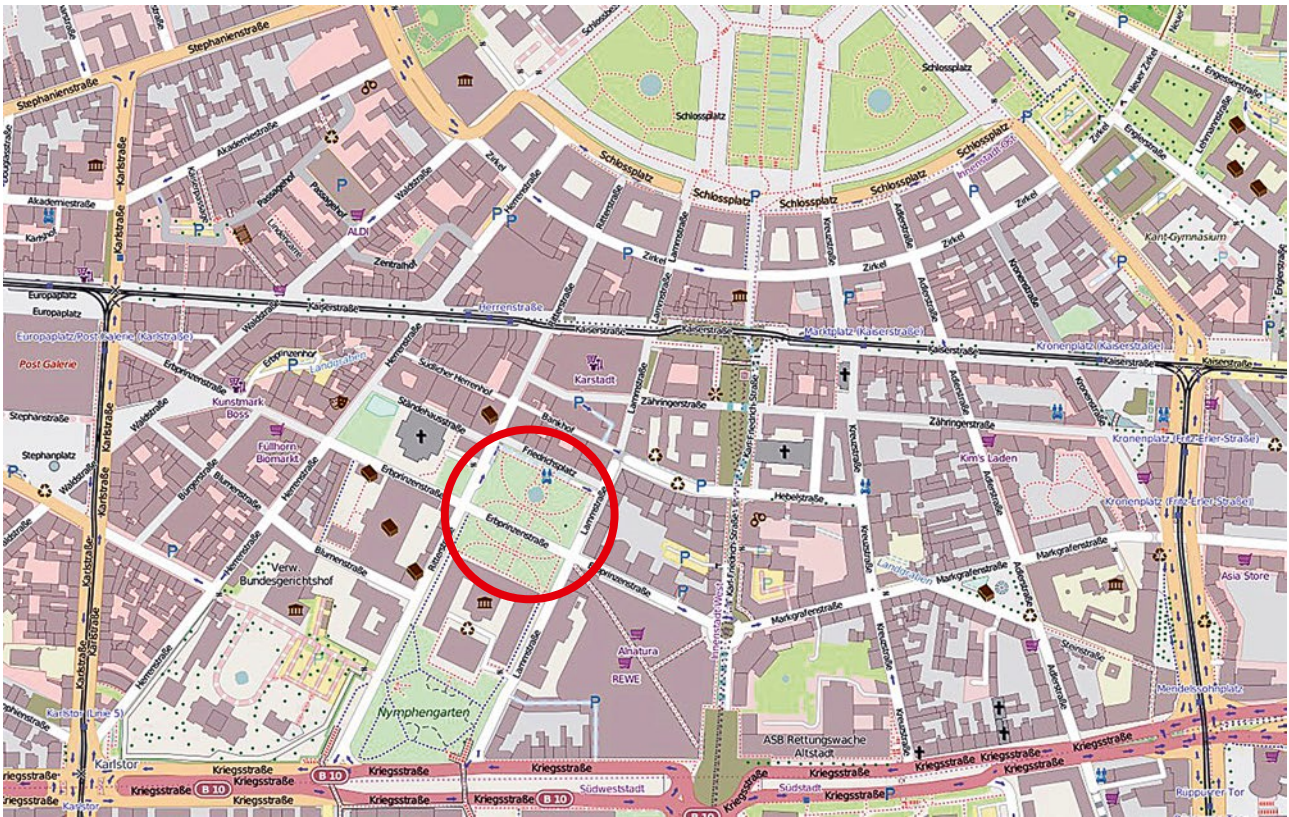
Die Messungen wurden gleichzeitig an drei Messpunkten durchgeführt. Die Lage der Messpunkte ist im Luftbild **Abbildung 6-3** eingezeichnet. Messpunkt MP1 wurde im Innern eines an den Friedrichsplatz angrenzenden Gebäudes gewählt (Besprechungsraum des Schulamtes Karlsruhe). Ein zweiter Messpunkt MP2 wurde auf dem Friedrichsplatz dem Boden platziert, ein dritter Messpunkt MP3 auf dem Dach des Naturkundemuseums (**Abbildungen 6-4 bis 6-6**). MP2 und MP3 befanden sich auf einer schallharten Platte.

Die Messungen wurden ab Freitag, 20.09.2013, 15:00 Uhr bis Samstag, 21.09.2013, um 2:00 Uhr durchgeführt. Vor-messungen waren am 26.06.2013 durch die LUBW erfolgt.

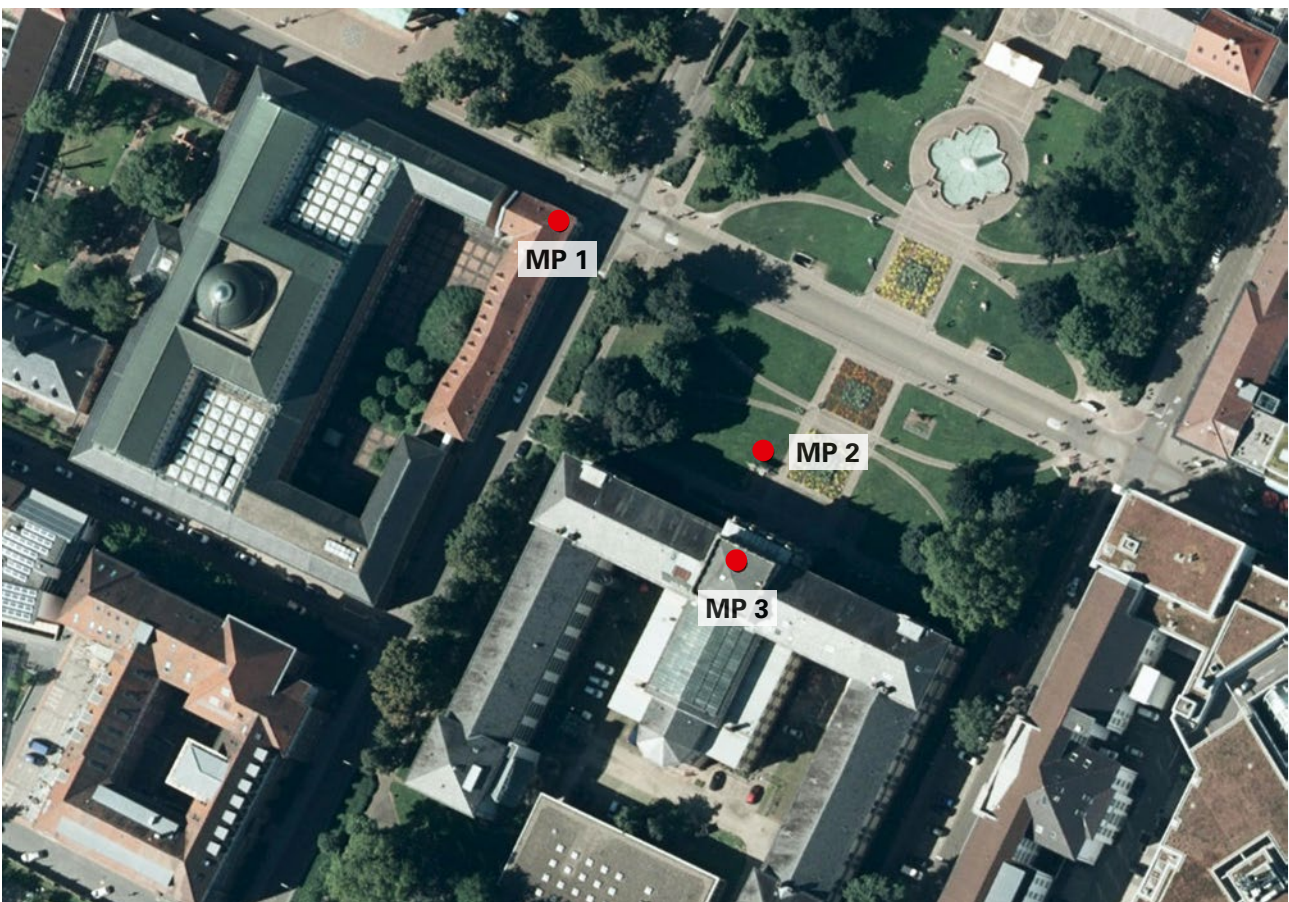


**Abbildung 6-1:** Friedrichsplatz in Karlsruhe, Blick nach Süden auf das Naturkundemuseum. Foto: LUBW





**Abbildung 6-2:** Stadtplan von Karlsruhe mit Friedrichsplatz (roter Kreis) und dem Verlauf der Straßenbahnlinien in der Umgebung (dunkle und gestrichelt markierte Linien). Quelle: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)



**Abbildung 6-3:** Genordetes Luftbild, Karlsruhe Friedrichsplatz. Lage der drei Messpunkte MP1 (Besprechungsraum Schulamt), MP2 (auf dem Friedrichsplatz) und MP3 (Dach Naturkundemuseum). Quelle: LUBW, LGL



Die Messungen sollten Aussagen zur Situation am Tage und in der Nacht erlauben. Das Verkehrsaufkommen (Kfz, Fußgänger, Fahrradfahrer) war der Witterung entsprechend als typisch für diesen Standort einzustufen. In einer Sommernacht oder bei Veranstaltungen liegen sicherlich höhere Frequentierungen vor.

Hinweis: Während der in der Umgebung laufender Windenergieanlagen gemessene Infraschall und die tieffrequenten Geräusche stets auch einen Geräuschteil des Windes (und ggf. auch einem Anteil, der am Mikrofon durch den Wind induziert wird) enthält, liegen die Verhältnisse bei der Messung der Innenstadtgeräusche viel günstiger. Hier spielen diese mit dem Wind zusammenhängenden Effekte praktisch keine Rolle. Der Infraschall und die tieffrequenten Geräusche konnten weitgehend ohne störende Windgeräusche gemessen werden. Lediglich auf dem Dach des Naturkundemuseums traten zeitweise Windgeräusche auf; Näheres dazu auf Seite 73.

## ERGEBNISSE

Die gemessenen Terzspektren für die drei Messpunkte, jeweils für den Zeitraum 16 - 17 Uhr, 22 - 23 Uhr und 0 - 1 Uhr sind in **Abbildung 6-8** dargestellt und werden im Folgenden erläutert:

Am Messpunkt MP1 (Schulamt, Innenmessung) wurden im Infraschallbereich unterhalb 20 Hz Terzpegel zwischen knapp 20 dB und 45 dB gemessen. Die Werte liegen alle unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Gut erkennbar ist, dass die Infraschallpegel in der Nacht um etwa 10 dB absinken. Im weiteren tieffrequenten Bereich findet sich eine deutliche Überhöhung zwischen 25 Hz und 63 Hz, was wohl auf Verkehrsgeräusche und elektrisch betriebene Geräte (das Gebäude war nicht stromlos geschaltet) zurückzuführen ist. Insgesamt sind bei der Innenmessung an MP1 infolge der Dämpfung durch die Gebäudehülle die geringsten Pegel festzustellen. Die Ergebnisse der Innenraummessung wurden nach DIN 45680 (1997) [4] ausgewertet,



**Abbildung 6-4:** Aufbau des Messpunkts MP1, Innenraummessung Schulamt Karlsruhe. Foto: LUBW



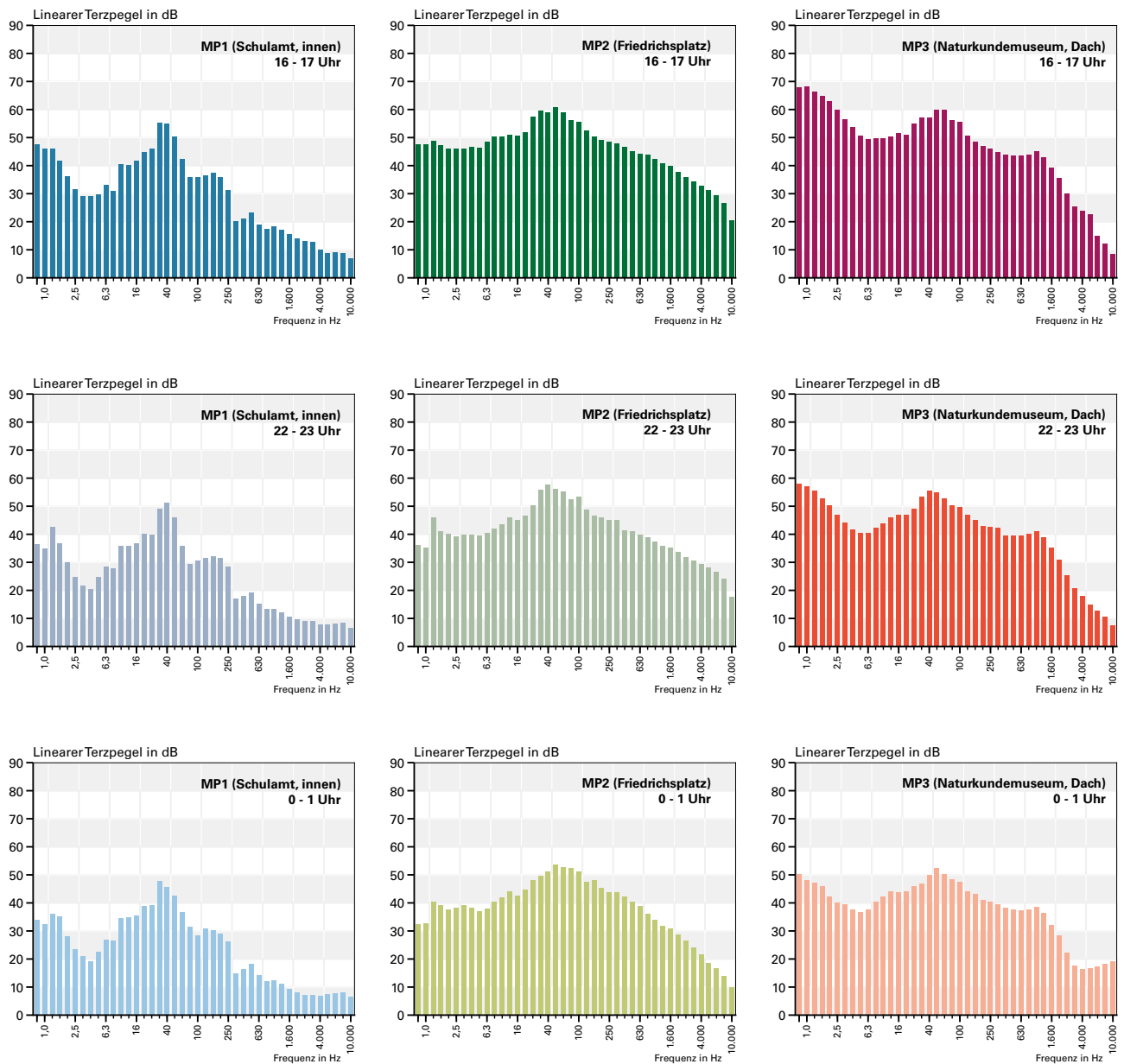
**Abbildung 6-5:** Messpunkt MP2 auf dem Friedrichsplatz vor dem Naturkundemuseum Karlsruhe. Foto: LUBW



**Abbildung 6-6:** Mikrofonposition am Messpunkt MP3 (Museumsdach) mit Blick über Karlsruhe. Am MP3 wurde zusätzlich die Meteorologie erfasst. Foto: LUBW



**Abbildung 6-7:** Blick vom Messpunkt MP3 (Museumsdach) nach Norden über Karlsruhe. Erkennbar ist die Flutlichtanlage des KSC-Stadions im Wildpark. Foto: LUBW



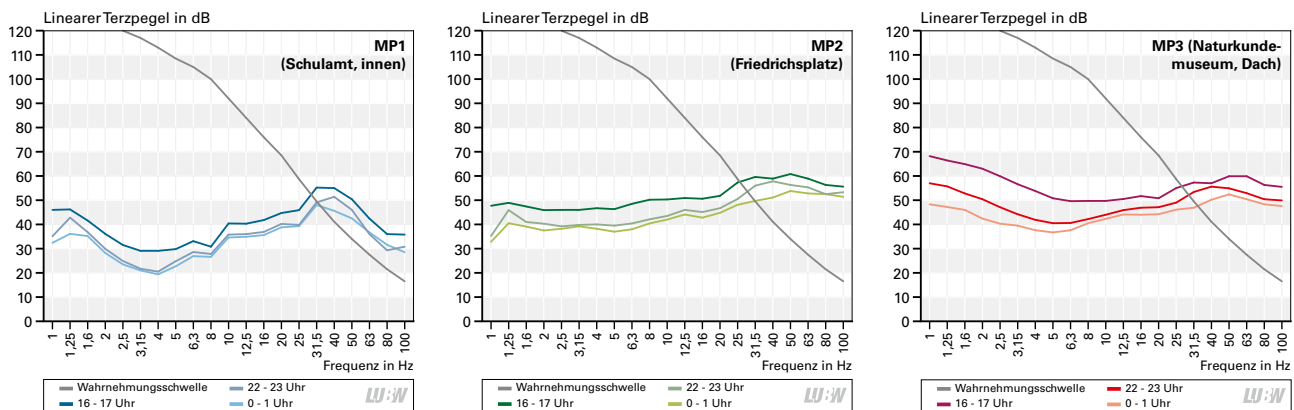
**Abbildung 6-8:** Gemessene Terzspektren für die drei Messpunkte zu verschiedenen Zeiten am Tage und in der Nacht. Linke Spalte: Messpunkt MP1 (Schulamt, innen); mittlere Spalte: Messpunkt MP2 (Friedrichsplatz); rechte Spalte: Messpunkt MP3 (Naturkundemuseum, Dach). Erläuterungen siehe Text.

wenn auch der Anwendungsbereich dieser Norm nicht den Straßenverkehrslärm umfasst. Zeitbereiche mit wesentlicher Fremdgeräuscheinwirkung am Messpunkt MP1 wurden dabei von der Auswertung ausgeschlossen. Folgende Zeiträume wurden gewählt: Für den Nachtzeitraum (22 - 23 Uhr, lauteste Stunde) sowie in Anlehnung an die Vorgehensweise der DIN 45680 (1997) [4] für den Tageszeitraum (16 - 17 Uhr, lauteste Stunde) sowie informativ für die Nachtstunde von 0 Uhr bis 1 Uhr. Die vergleichsweise herangezogenen Anhaltswerte des Beiblatts zur o. g. Norm (diese sind formal nur für den Betrieb von Anlagen gültig) werden sowohl im Tages- als auch im Nachtzeit-

raum überschritten. Deutlich hervortretende Einzeltöne lagen nicht vor. Informativ wurden die Messdaten auch nach dem überarbeiteten Entwurf der DIN 45680 (2013) [5] bewertet. Die vergleichsweise herangezogenen Anhaltswerte (diese sind formal nur für den Betrieb von Anlagen gültig) werden sowohl im Tages- als auch im Nachtzeitraum überschritten.

Die Daten der Messpunkte MP2 und MP3 wurden entsprechend Abschnitt 4.1 korrigiert (schallharte Platte). Am Messpunkt MP2 (Friedrichsplatz vor dem Museum) wurden im Infraschallbereich bis 20 Hz Terzpegel zwischen





**Abbildung 6-9:** Vergleichende frequenzabhängige Darstellung der Terzschallpegel für die drei Messpunkte zu verschiedenen Zeiten am Tage und in der Nacht. Die Ergebnisse für MP2 und MP3 wurden korrigiert (schallharte Platte, siehe Abschnitt 4.1). Zur Orientierung wurde die Wahrnehmungsschwelle mit angegeben. Links Messpunkt MP1 (Schulamt, innen); Mitte Messpunkt MP2 (Friedrichsplatz); rechts Messpunkt MP3 (Naturkundemuseum, Dach).

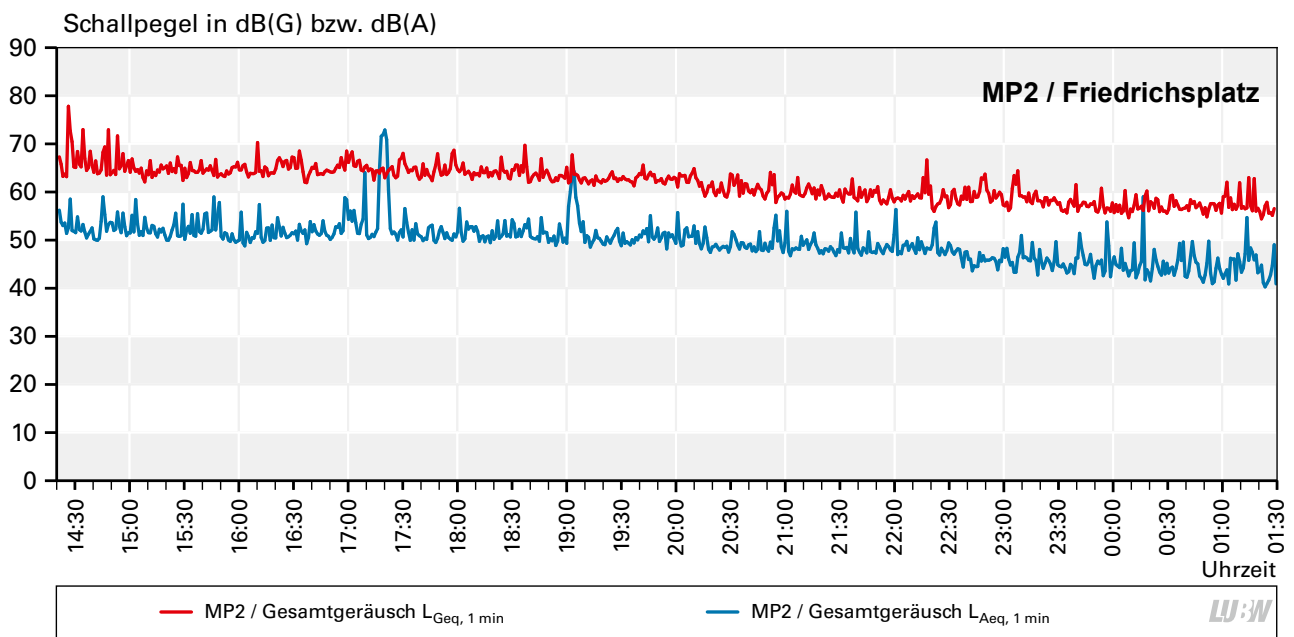
knapp 35 dB und etwas über 50 dB gemessen. Auch hier ist eine Abnahme des Infraschalls in der fortgeschrittenen Nacht zu erkennen. Im tieffrequenten Bereich ist auch hier eine Überhöhung festzustellen, die auf den Straßenverkehr zurückgeführt werden kann. Hier werden etwa im Bereich 32 Hz bis 80 Hz auch nachts Pegel über 55 dB, also oberhalb der Wahrnehmungs- bzw. Hörschwelle erreicht. Ein interessanter Effekt ist bei der 1,25-Hz-Terz erkennbar, die z. B. im Terzspektrum für MP2 zwischen 22 und 23 Uhr deutlich herausragt. Hierbei handelt es sich um eine Eigenfrequenz des weitgehend von Gebäuden umfassten Friedrichsplatzes (eine halbe Wellenlänge entspricht gerade der Platzausdehnung). Im Schmalbandspektrum (hier nicht gezeigt) kann dieser Effekt noch weiter analysiert werden.

Am Messpunkt MP3 (Museumsdach) sind ähnliche Verhältnisse wie schon bei MP2 erkennbar – mit zwei Unterschieden: Im Infraschall unterhalb 5 Hz ist eine Überhöhung feststellbar, die auf eine hier etwas erhöhte Windgeschwindigkeit auf dem Dach und damit zusammenhängende Windeffekte zurückzuführen ist. Eine auftretende Überhöhung im Bereich oberhalb 500 Hz ist zumindest teilweise auf Rollgeräusche von Kfz weiter entfernt gelegener Straßen, etwa die B 10 (Kriegstraße) zurückzuführen. Diese waren auf dem Dach festzustellen, wurden ansonsten aber abgeschirmt. In den Abendstunden war auch ein direkter Blick zum Wildparkstadion des KSC möglich, wo ein Spiel stattfand (Abbildung 6-7).

In einer weiterführenden Analyse der Schmalbandspektren (hier nicht aufgeführt) konnten bei einigen Frequenzen noch einzeln hervortretende Linien detektiert werden, die sich aber nicht alle konkreten Quellen zuordnen ließen.

In **Abbildung 6-9** sind die Verläufe der linearen Terzpegel im Bereich von 1 Hz bis 100 Hz für die Messpunkte MP1 bis MP3 im Vergleich zur Wahrnehmungsschwelle (nach Entwurf der DIN 45 680 [5]; unterhalb 8 Hz ergänzt durch Literaturwerte [11]) dargestellt, siehe auch **Tabelle A3-1**. Die Ergebnisse für MP2 und MP3 wurden, wie im Abschnitt 4.1 dargestellt, aufgrund des Einsatzes einer schallharten Platte korrigiert.

**Abbildung 6-10** zeigt den Verlauf des A-bewerteten und des G-bewerteten Schallpegels über den Messzeitraum am Messpunkt MP2 (Friedrichsplatz). Gut erkennbar ist, dass der G-Pegel, welcher die tieffrequenten Geräusche inkl. Infraschall repräsentiert, ab den Abendstunden langsam und stetig absinkt. Die G-Pegel lagen im Messzeitraum am Messpunkt MP1 (innen) meist zwischen 45 dB(G) und 60 dB(G), zeitweise auch noch darüber. An den Messpunkten MP2 (Friedrichsplatz) und MP3 (Dach) lagen die Werte meist zwischen 55 dB(G) und 65 dB(G), erreichten zeitweise auch bis über 70 dB(G).



**Abbildung 6-10:** Verlauf des A- und G-bewerteten Summenpegels  $L_{A_{eq}}(t)$  und  $L_{G_{eq}}(t)$  am Messpunkt MP2 (Friedrichsplatz) im Zeitraum 20.09.2013, ca. 14:30 Uhr bis 21.09.2013, 01:30 Uhr

# 7 Geräuschquellen in Wohngebäuden

Das Leben im modernen Haushalt ist durch den Gebrauch technischer Geräte geprägt, welche dazu dienen, den Alltag zu erleichtern oder angenehm zu gestalten. Die Standorte der Geräte orientieren sich meist an den vorhandenen Versorgungsanschlüssen für Strom, Wasser oder Gas. Dabei wird in der Regel auch auf eine möglichst störungsarme Nutzung der Wohnräume geachtet. Geräte wie Kühlschränke oder Lüftungen sind dauerhaft oder intermittierend in Betrieb, andere Geräte wie Staubsauger oder Elektrowerkzeuge nur kurzfristig. Während des Betriebs emittiert jedes technische Gerät charakteristische Geräusche. Je nach Quelle können aufgrund unterschiedlicher Betriebsmodi auch unterschiedliche Geräuschmuster auftreten.

Mit Hilfe von Herstellerangaben können sich Käufer vor der Anschaffung technischer Geräte über die zu erwartenden Geräusche informieren. In den Datenblättern sind jedoch häufig nur die A-bewerteten Pegel angegeben. Diese lassen keine Rückschlüsse zu, wie sich der Schall auf die verschiedenen Frequenzen verteilt.

Um in diesem Bericht vergleichend auch tieffrequente Geräusche darstellen zu können, die im Wohnumfeld auftreten, nahm die LUBW Schallpegelmessungen in einem Wohngebäude in der Tübinger Innenstadt vor. Das Mehrfamilienhaus in Fachwerkbauweise stammt aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Die Gefache der Wände sind mit Sandstein ausgemauert und die Holzbalkendecken sind mit Lehmstaken gefüllt. Decken und Wände sind zusätzlich mit einer 3-4 cm dicken Kalkputzschicht versehen. Im Zuge von Sanierungsarbeiten während der letzten Jahre wurden in einigen Räumen, z. B. in den Badezimmern, die bauzeitlichen Sandsteinplatten bzw. Tonfliesen auf einer Schicht aus bewehrtem Zementestrich verlegt. Das Gebäude liegt in einem verkehrsberuhigten Bereich; die nächsten mehrspurig befahrbaren Straßen sind etwa 150 m entfernt. Von dort ausgehende Verkehrsgläusche werden durch die dichte Bebauung der Tübinger Innenstadt weitgehend abgeschirmt. Die akustische Situation um das Gebäude herum ist maßgeblich durch Kommunikationsgläusche von Passanten geprägt.

Bei den Messungen am 04.08.2015 wurden zwei Waschmaschinen verschiedener Hersteller, ein Kühlschrank, eine Ölheizung und eine Gasheizung erfasst. Nähere Angaben zur eingesetzten Messtechnik finden sich im Anhang A4.

## 7.1 Waschmaschine

Die Waschmaschinen befanden sich in zwei Wohnungen im 1. und 2. Obergeschoss des Hauses. Die Messungen erfolgten jeweils an einem Messpunkt MP1 im Nahbereich innerhalb des Aufstellungsraums sowie an einem Messpunkt MP2 in einem getrennten Raum. Bei der Messung an Waschmaschine 1 im 1. Obergeschoss war der Messpunkt MP1 in Raummitte etwa 0,5 m von der Waschmaschine entfernt. Messpunkt MP2 befand sich etwa 3 m senkrecht über MP1 im 2. Obergeschoss. Die Waschmaschine 2 stand im 2. Obergeschoss. Hier wurde der Messpunkt MP1 ebenfalls in Raummitte ca. 0,5 m vor der Waschmaschine eingerichtet, während der Messpunkt MP2 im Nebenraum – durch eine Wand – getrennt in etwa 5 m Entfernung platziert war.

## ERGEBNISSE

Die Messungen an den beiden Waschmaschinen fand im Zeitraum von 10:50 Uhr bis 11:30 Uhr statt. Zeitbereiche mit Fremdgeräuscheinwirkung wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

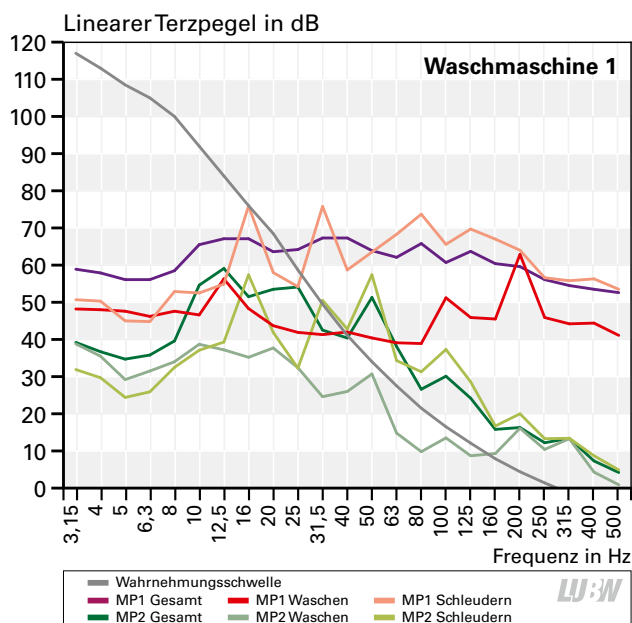
Beim Betrieb der Waschmaschine 1 wurden am Messpunkt MP1 im Infraschallbereich unter 20 Hz Terzpegel zwischen 44 dB und 76 dB gemessen (**Abbildung 7.1-1**). Die höchsten Pegel traten im Schleudergang und die niedrigsten im Waschgang auf. Am Messpunkt MP2 ergaben sich unterhalb 20 Hz während der Messung an Waschmaschine 1 Terzpegel von 29 dB bis 60 dB. Auch hier wurden im Schleudergang die höheren Pegel registriert.

An Waschmaschine 2 lagen die Terzpegel am Messpunkt MP1 im Infraschallbereich unterhalb 20 Hz zwischen 35 dB und 70 dB (**Abbildung 7.1-2**). Auch hier wurden die höchsten Terzpegel im Schleudergang registriert. Die Messung an Messpunkt MP2 ergab im selben Frequenzbereich Terzpegel zwischen 26 dB und 71 dB.

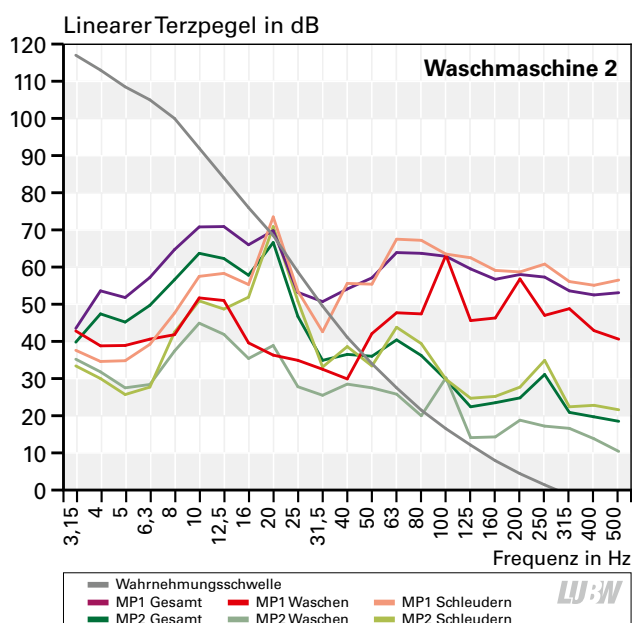
Die Kurven für die einzelnen Betriebsmodi der beiden vermessenen Waschmaschinen verlaufen für die Messpunkte MP1 und MP2 im Infraschallbereich unterhalb 20 Hz nahezu parallel. Dem gegenüber ist oberhalb 20 Hz zu erkennen, dass sich die Differenz zwischen den an beiden Messpunkten erfassten Terzpegeln mit zunehmender Frequenz vergrößert. Dies ist auf die Schalldämmwirkung

der Gebäudebauteile (Raumdecke bzw. Wand) zurückzuführen. Die Bauteile mindern den höherfrequenten Schall in deutlich höherem Maße als es im Infraschallbereich der Fall ist.

Die Einzeltöne bei 16 Hz (Waschmaschine 1) sowie 20 Hz (Waschmaschine 2) lassen sich durch die jeweilige Drehzahl beim Schleudern begründen. Die 16 Hz-Terz korreliert dabei mit 960 U/min, die 20 Hz-Terz mit 1 200 U/min. Der zusätzlich hervortretende Einzelton an Waschmaschine 1 bei etwa 31,5 Hz ist eine harmonische Oberwelle der 16 Hz-Terz. Je nach Betriebsmodus reichen einzelne Terzpegel bereits zwischen etwa 16 Hz und 20 Hz an die Wahrnehmungsschwelle nach **Tabelle A3-1** heran; oberhalb 50 Hz liegen die Terzpegel generell im hörbaren Bereich.



**Abbildung 7.1-1:** Terzschallpegel Waschmaschine 1 an den Messpunkten MP1 und MP2 für verschiedene Betriebszustände, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. „Gesamt“: Mittelungspegel über ganzen Waschgang.



**Abbildung 7.1-2:** Terzschallpegel Waschmaschine 2 an den Messpunkten MP1 und MP2 für verschiedene Betriebszustände, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich. „Gesamt“: Mittelungspegel über ganzen Waschgang.

## 7.2 Heizung und Kühltank

Bei den beiden gemessenen Heizungen handelte es sich zum einen um einen im Keller aufgestellten Ölkessel mit Druckzerstäuberbrenner, zum anderen um eine Gas-therme, die im Badezimmer des 2. Obergeschosses an einer Wand installiert war. Der Kühltank befand sich im 2. Obergeschoss in einer Ecke der Küche. Die Messungen der hier aufgeführten Geräuschquellen fanden an jeweils einem Messpunkt im Abstand von ca. 0,5 m statt.

### ERGEBNISSE

Die Terzspektren während des Betriebs der beiden Heizungen sowie des Kühltanks wurden im Zeitraum von 11:40 Uhr bis 13:30 Uhr messtechnisch erfasst. Die Ergebnisse der Messungen sind in der **Abbildung 7.2-1** dargestellt. Wie bei den anderen Messungen wurden Fremdgeräusche, z. B. durch das Messpersonal oder Passanten im Freien, von der Auswertung ausgeschlossen.

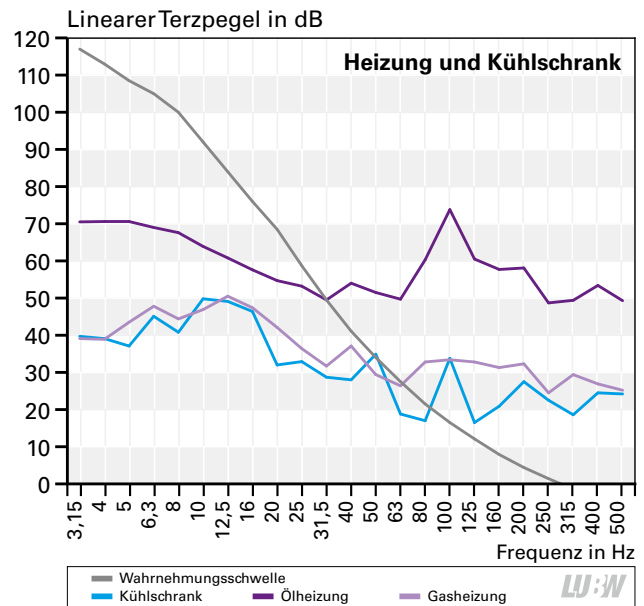
Im Infraschallbereich unterhalb der 20 Hz-Terz konnten an der Ölheizung Pegel von etwa 55 dB bis 70 dB gemessen werden. Im tieffrequenten Bereich zwischen 20 Hz und 80 Hz liegen die Terzpegel zwischen 55 dB und 60 dB. Bei 100 Hz ist ein Einzelton mit einem Terzpegel von 74 dB zu erkennen. An der Gastherme wurden im Infraschall unter 20 Hz Pegel zwischen 40 dB und 50 dB erfasst. Im tieffrequenten Bereich zwischen 20 Hz und 80 Hz liegen die an

der Gasheizung gemessenen Terzpegel zwischen 40 dB und 50 dB. Die Differenz zwischen den an der Ölheizung und den an der Gastherme gemessenen Pegeln im tieffrequenten Bereich beträgt zwischen 10 dB und 40 dB.

Der in der Küche des 2. Obergeschosses gemessene Kühlschrank lieferte im Infraschallbereich Terzpegel zwischen 32 dB und 50 dB. Zwischen 20 Hz und 80 Hz wurden am Kühlschrank Terzpegel zwischen 17 dB und 50 dB gemessen. Während sich das Terzspektrum der Ölheizung durch höhere Pegel deutlich von den anderen gemessenen Anlagen abhebt, sind sich die Terzspektren der Gastherme sowie des Kühlschranks sehr ähnlich.

## ZUSAMMENFASSUNG

Während der Messungen im Wohngebäude wurden an Waschmaschinen die höchsten Pegel während des Schleudergangs erfasst. Tonhaltigkeiten in einzelnen Terzen korrelieren mit der Drehzahl der Waschmaschinentrommel während des Schleuderns. Gebäudebauteile dämpfen höherfrequente Geräuschanteile erwartungsgemäß in größerem Maße als bei tiefen Frequenzen. Die Wahrnehmungsschwelle nach **Tabelle A3-1** wurde bei den Waschmaschinen im Frequenzbereich oberhalb 16 Hz bzw. 20 Hz erreicht. Bei den anderen Geräten erreichten die Infraschallpegel diese Schwelle nicht.



**Abbildung 72-1:** Terzschallpegel der Geräusche von Ölheizung, Gasheizung und Kühlschrank in 0,5 m Abstand vom Gerät, Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich





# 8 Natürliche Quellen

## 8.1 Ländliche Umgebung

Um Aussagen darüber machen zu können, wieviel Infraschall der Wind in freier Natur verursacht, wurden im Rahmen des Messprogramms am 09.05.2015 Schallpegelmessungen bei Starkwind im freien Feld (Messpunkt MP1), am Waldrand (Messpunkt MP2) und im Wald (Messpunkt MP3) durchgeführt. Die drei Messpunkte waren, ausgehend von MP1, in Mitwindrichtung hintereinander positioniert. Die Schallpegelmessungen wurden wie bei den Windenergieanlagen auf einer schallharten Platte mit Primär- und Sekundärwindschirm durchgeführt. Zeitgleich wurde am Messpunkt MP1 in 10 m Höhe (Wiese) die Windgeschwindigkeit gemessen. Die **Abbildungen 8.1-1 bis 8.1-3** vermitteln einen Eindruck von der Positionierung der Messpunkte. Der Messpunkt MP1 liegt ca. 130 m vom Waldrand entfernt.

Die Auswertung erfolgte für den Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 10 kHz. Die Vorgehensweise entsprach der Analyse der Messungen an Windenergieanlagen, wie sie im

Abschnitt 4 dargestellt sind. Je Messpunkt wurden zwei Zeitabschnitte mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten (6 m/s und 10 m/s am Messpunkt MP1 Wiese) untersucht, innerhalb derer der Wind möglichst gleichmäßig wehte. Dadurch wurden zwei Situationen mit stark voneinander abweichenden Umgebungsbedingungen erfasst. Aufgrund der räumlichen Situation an den Messpunkten MP2 (Waldrand) und MP3 (Wald) ist davon auszugehen, dass dort die Windgeschwindigkeit jeweils geringer ist als zum gleichen Zeitpunkt am Messpunkt MP1 (Wiese).

### ERGEBNISSE: SCHMALBANDPEGEL

In **Abbildung 8.1-4** sind die aus den Audiosignalen ermittelten Schmalbandspektren bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von ca. 6 m/s und 10 m/s in 10 m Höhe (gemessen am Messpunkt MP1) dargestellt. Die drei Grafiken in der linken Spalte ermöglichen den Vergleich der Messergebnisse für die beiden Windgeschwindigkeiten an jedem einzelnen Messpunkt. Die beiden Grafiken in der rechten Spalte zeigen, getrennt für die Windgeschwindigkeiten 6 m/s und 10 m/s, welche Schallpegel an den drei



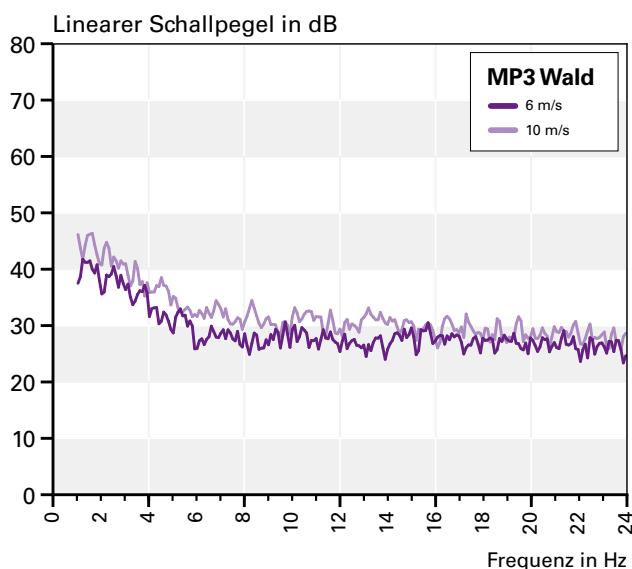
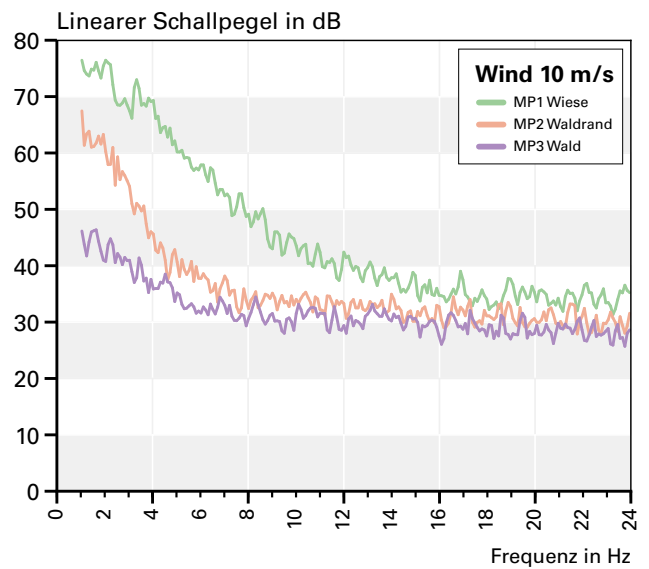
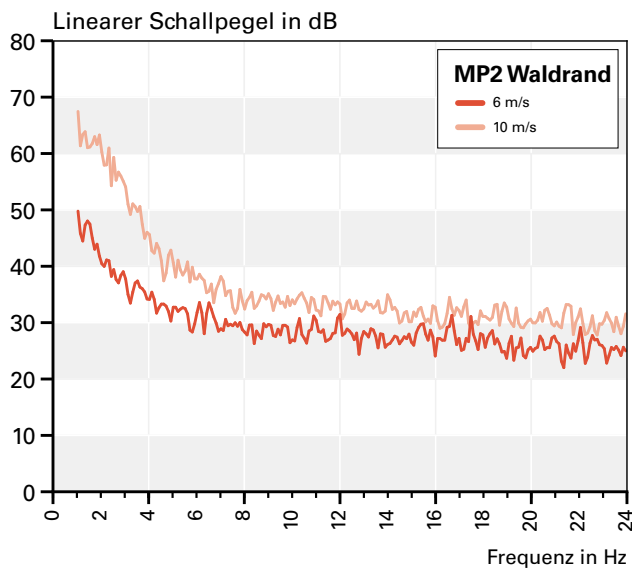
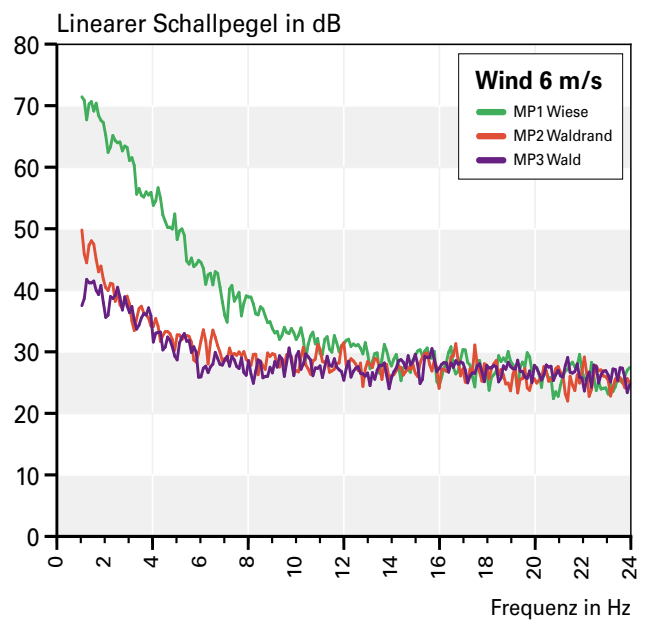
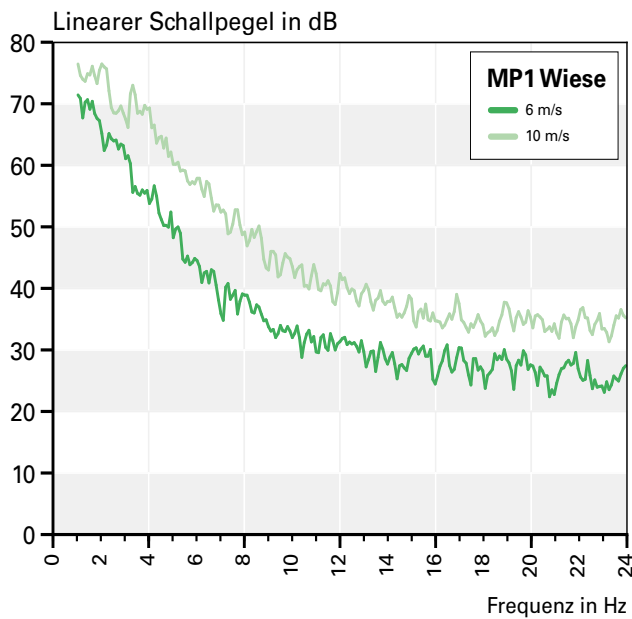
**Abbildung 8.1-1:** Messpunkt MP1 auf freiem Feld (links) und Meteorologiemast (rechts), Blick Richtung Wald. Foto: Fa. Wölfel



**Abbildung 8.1-2:** Messpunkt MP2, Waldrand. Foto: Fa. Wölfel



**Abbildung 8.1-3:** Messpunkt MP3 im Wald, ca. 90 m vom Messpunkt MP 2 entfernt. Foto: Fa. Wölfel

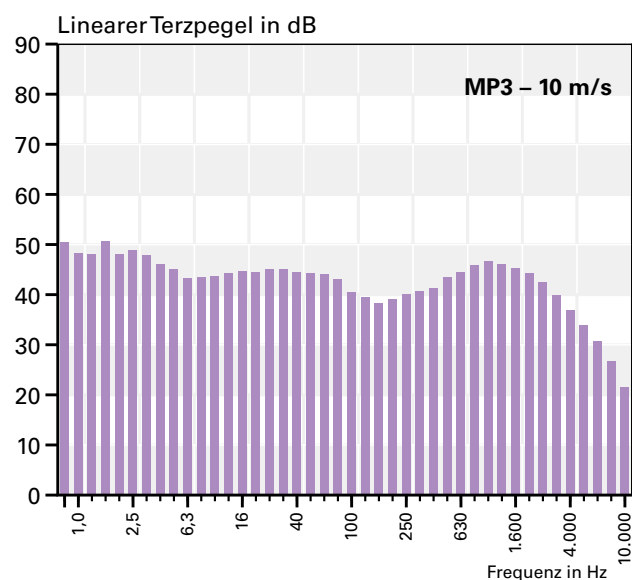
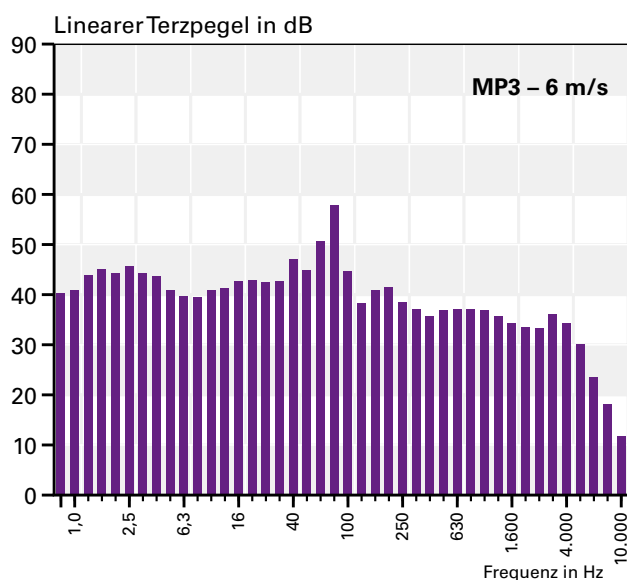
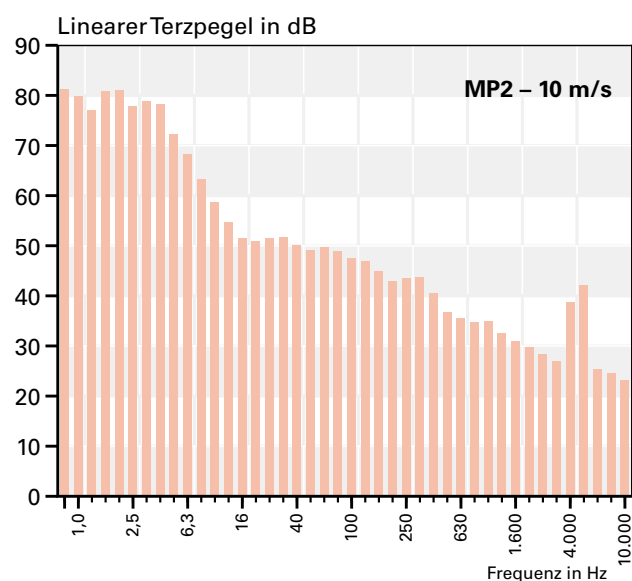
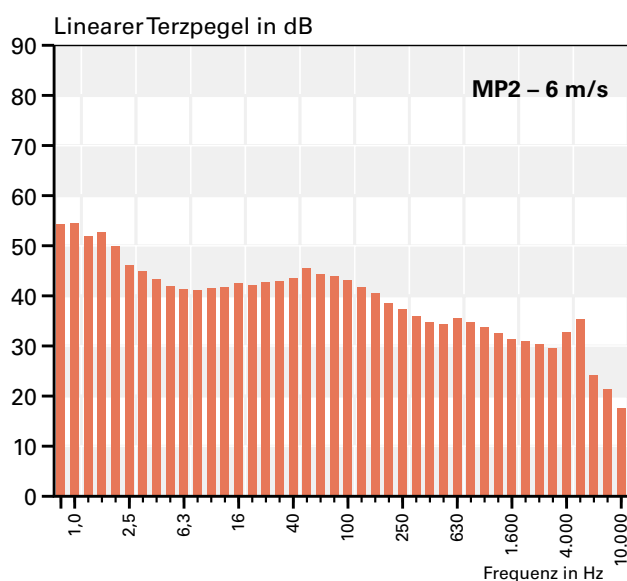
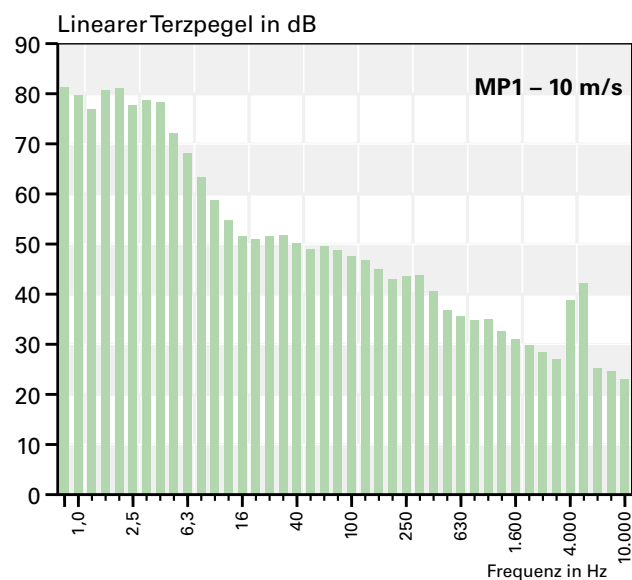
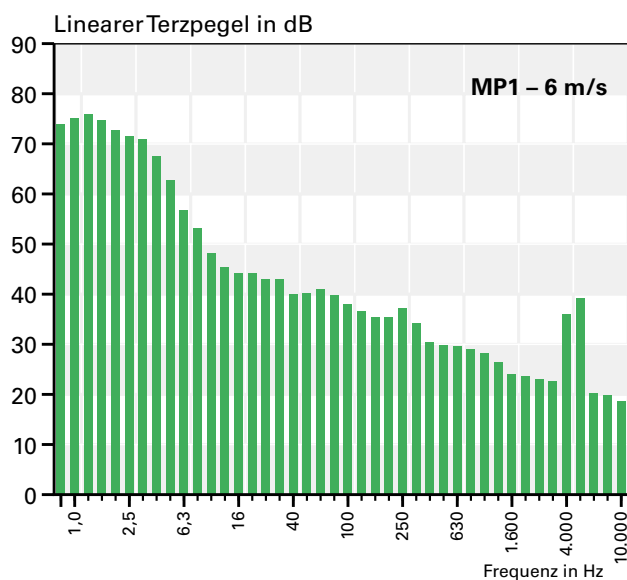


LUBW

**Abbildung 8.1-4:** Schmalbandspektren der Geräusche an den Messpunkten MP1 (Wiese), MP2 (Waldrand) und MP3 (Wald) für den Frequenzbereich des Infraschalls bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Die Windmessung erfolgte stets am Messpunkt MP1 (Wiese).

Linke Spalte: Vergleich der Schmalbandpegel für die verschiedenen Windgeschwindigkeiten, getrennt dargestellt für die Messpunkte MP1 (Wiese), MP2 (Waldrand) und Messpunkt MP3 (Wald).

Rechte Spalte: Vergleich der Schmalbandpegel an den drei Messpunkten, getrennt dargestellt für die Windgeschwindigkeiten 6 m/s (oben) und 10 m/s (unten)



**Abbildung 8.1-5:** Terzspektren des Hintergrundgeräusches an den Messpunkten MP1 (Wiese), MP2 (Waldrand) und MP3 (Wald). Linke Spalte: Windgeschwindigkeit 6 m/s; rechte Spalte: Windgeschwindigkeit 10 m/s. Die Windmessung erfolgte stets am Messpunkt MP1 (Wiese).

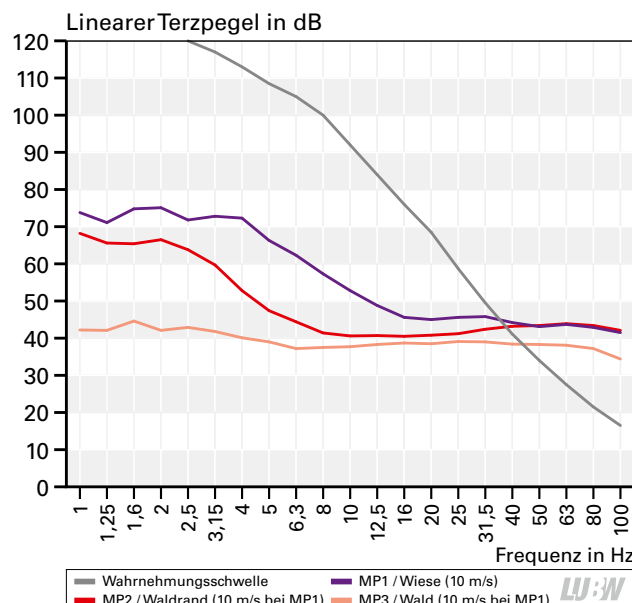
Messpunkten verzeichnet wurden. Es ist gut zu erkennen, wie die Pegel von der Messposition und der Windgeschwindigkeit abhängen. Auf freier Wiese liegen die Pegel bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s rund 10 bis 15 dB höher als bei 6 m/s. Am Waldrand ist dieser Unterschied für Frequenzen oberhalb etwa 5 Hz schwächer ausgeprägt, er beträgt nur noch 5 bis 10 dB. Im Wald ist die Differenz 5 dB oder weniger. Die Spreizung der Messwerte zwischen den drei Messpunkten fällt von rund 30 dB am untersten Ende des Spektrums auf 0 bis 5 dB an seinem oberen Ende, je nach Windgeschwindigkeit. Nennenswerte Pegelunterschiede zwischen Waldrand und Wald treten allenfalls unterhalb 10 Hz auf. Die Pegelunterschiede zwischen Wiese und Wald werden demgegenüber erst oberhalb 20 Hz gering.

### ERGEBNISSE: TERZPEGEL

In der **Abbildung 8.1-5** sind die Terzspektren des Hintergrundgeräuschs an allen drei Messpunkten für den Frequenzbereich von 0,8 Hz bis 10 000 Hz dargestellt. Die Windgeschwindigkeit betrug 6 m/s (linke Spalte) und 10 m/s (rechte Spalte). Auf offener Wiese überwiegen die tiefen Frequenzen im Spektrum; am Waldrand und noch stärker im Wald ist hingegen eine Verschiebung zu höheren Frequenzen festzustellen. Während der Wind mit Annäherung an den Wald abnimmt und deshalb am Mikrofon weniger Windgeräusche induziert werden, tritt das Blätterrauschen der Bäume in Richtung Wald immer deutlicher in Erscheinung. Die Spitzenwerte bei ca. 4 000 Hz sind auf Grillenzirpen und Vogelgezwitscher zurückzuführen.

### VERGLEICH MIT DER WAHRNEHMUNGSSCHWELLE

In der **Abbildung 8.1-6** sind die Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten Wiese, Waldrand und Wald für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 Hz zusammen mit der Wahrnehmungsschwelle im Vergleich dargestellt.



**Abbildung 8.1-6:** Vergleich der Terzspektren des Gesamtgeräuschs an den Messpunkten MP1 (Wiese), MP2 (Waldrand) und MP3 (Wald) mit der Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1. Die Messwerte wurden gemäß Abschnitt 4.1 korrigiert.

Die Windgeschwindigkeit betrug 10 m/s. Im Bereich des Infraschalls liegen die Kurven deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

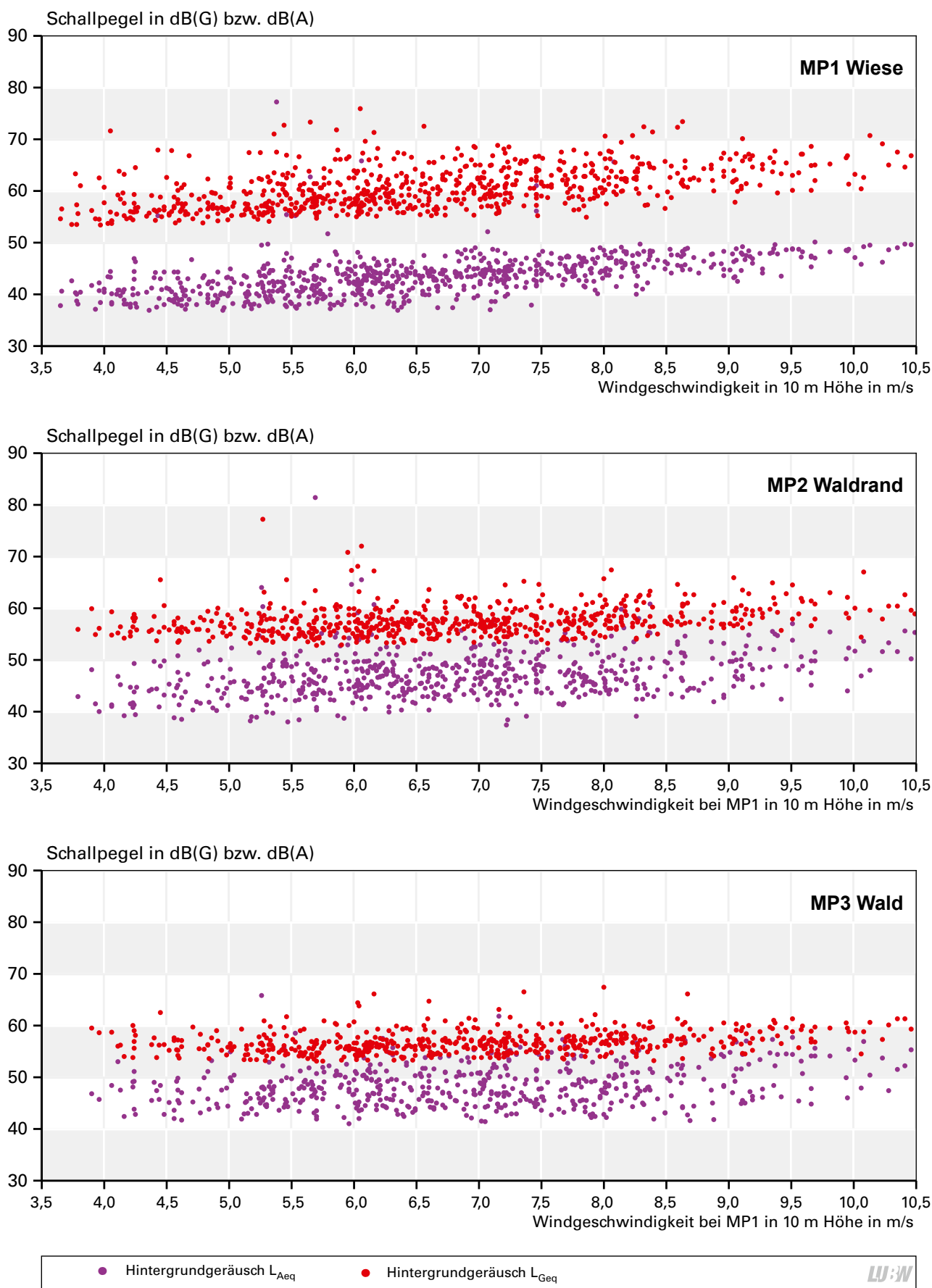
### EINFLUSS DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Die Daten in **Abbildung 8.1-7** zeigen, dass sowohl die Hörschallpegel (A-Pegel) als auch die Infraschallpegel (G-Pegel) mit wachsender Windgeschwindigkeit ansteigen. Auffällig ist die Pegelabnahme des G-bewerteten Pegels vom Messpunkt MP1 (Wiese) in Richtung Messpunkt MP3 (Wald). Dies korreliert mit der vom freien Gelände in Richtung Wald abnehmenden Windgeschwindigkeit. Windinduzierte Effekte am Mikrofon können ausgeschlossen werden (vgl. Abschnitte 4.5 und 4.6, Erdlochmessung). Der A-bewertete Pegel erhöht sich mit der Annäherung zum Wald, was auf das Rauschen der Blätter zurückgeführt werden kann, welches sich im A-Pegel niederschlägt.

**Tabelle 8.1-1:** Infraschallpegel in ländlicher Umgebung an den drei Messpunkten bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

Messpunkt	G-bewertete Pegel in dB(G)	Infraschall-Terzpegel ≤ 20 Hz in dB *
	Wind 6 / 10 m/s	Wind 6 / 10 m/s
MP1 Wiese, 130 m vom Wald entfernt	50-65 / 55-65	40-70 / 45-75
MP2 Waldrand	50-60 / 50-60	35-50 / 45-75
MP3 Wald	50-60 / 50-60	35-40 / 40-45

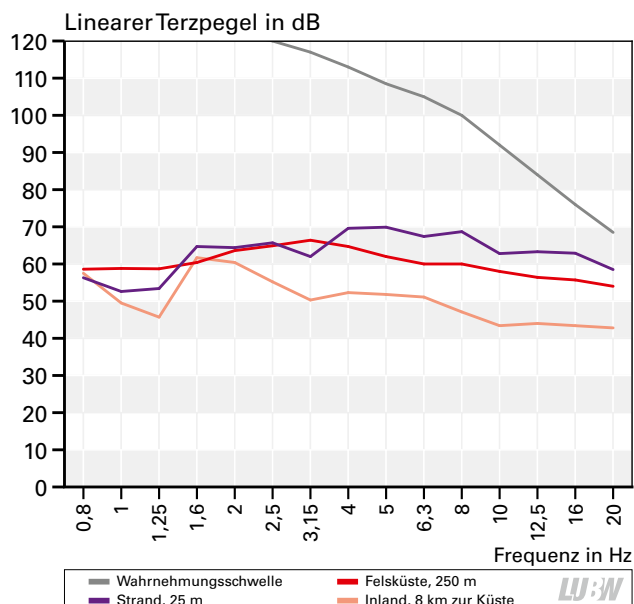
\* Lineare Terzpegel in dB(Z)



**Abbildung 8.1-7:** Hörschallpegel (A-Pegel) und Infraschallpegel (G-Pegel) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die drei Messpunkte MP1 (Wiese), MP2 (Waldrand) und MP3 (Wald). Dargestellt sind die G-Pegel (rote Punkte) und die A-Pegel (violette Punkte). Die Windmessung erfolgte stets am Messpunkt MP1 (Wiese).

## FAZIT

Der Infraschall zeigt eine starke Abhängigkeit von der Messposition. In offenem Gelände wurden hier im Schmalbandspektrum um bis zu 30 dB höhere lineare Pegel als im Wald gemessen (**Tabelle 8.1-1**). Oberhalb 16 Hz sind die Unterschiede nicht mehr so stark ausgeprägt, es ist jedoch bei tiefen Frequenzen auch hier eine Tendenz zu höheren Pegeln im freien Gelände gegenüber dem Wald zu beobachten. Beim A-bewerteten Hörschall wurden im Wald höhere Pegel gemessen, was auf Blätterrauschen zurückzuführen ist.



## 8.2 Meeresbrandung

Die Meeresbrandung ist neben den Windgeräuschen eine weit verbreitete natürliche Quelle tieffrequenter Geräusche und Infraschall. Die LUBW konnte im Rahmen dieses Messprojektes keine eigenen Messungen an der Küste vornehmen. Daher werden aktuell publizierte Werte herangezogen, um eine Größenordnung zu vermitteln. TURNBULL, TURNER und WALSH veröffentlichten 2012 Messwerte für Meeresbrandung als natürliche Infraschallquelle [21]. Danach betrug der G-bewertete Infraschallpegel am Strand in

**Abbildung 8.2-1:** Terzspektren des Gesamtgeräuschs für Meeresbrandung, unterschiedliche Randbedingungen nach [21], Wahrnehmungsschwelle nach Tabelle A3-1 zum Vergleich

25 m Entfernung zur Wasserlinie 75 dB(G), in 250 m Entfernung zu einem Felsenkliff 69 dB(G) und in 8 km Entfernung zur Küste 57 dB(G) (**Tabelle 8.2-1**). In Küstennähe lagen die Terzpegel bei verschiedenen Frequenzen unterhalb von 20 Hz im Bereich von 53 dB bis 70 dB (**Abbildung 8.2-1**).

**Tabelle 8.2-1:** Infraschallpegel der Meeresbrandung für unterschiedliche Randbedingungen

Quelle	G-bewertete Pegel in dB(G)	Infraschall-Terzpegel $\leq 20$ Hz in dB *
Strand, in 25 m Entfernung von der Wasserlinie	75	53 bis 70
Felsenkliff, in 250 m Entfernung	69	54 bis 65
Inland, in 8 km Entfernung von der Küste	57	43 bis 63

\* Lineare Terzpegel in dB(Z)



# 9 Konzeption einer Dauermessstation für tieffrequente Geräusche

## 9.1 Aufgabenstellung

Integraler Bestandteil des Messprojekts „Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen“ war auch die Erstellung eines Machbarkeitskonzeptes für eine autark arbeitende Dauermessstation zur Erfassung und Dokumentation der Geräuschsituation an Windkraftanlagen. Tieffrequente Einwirkungen sollten dabei besonders berücksichtigt werden. Bei der Konzeption war davon auszugehen, dass eine solche Messstation primär im Rahmen von Überwachungsmessungen oder in Zusammenhang mit Beschwerdefällen eingesetzt werden soll. Zudem sollte mit der Dauermessstation eine Möglichkeit zur Durchführung von Sonderuntersuchungen, z. B. zur Ermittlung von Infraschall oder Geräuschmodulationen oder Vorher/Nachher-Untersuchungen, geschaffen werden. Den folgenden Vorgaben war Rechnung zu tragen:

- DIN EN 61400-11 „Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmessverfahren“ (2013) [6]
- Technische Richtlinien für Windenergieanlagen Teil 1, Revision 18 (Stand 01.02.2008, herausgegeben von der FGW Fördergesellschaft Windenergie e.V.) [7]
- Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm (1998) [10]
- DIN 45680 „Messung von Bewertung tieffrequenter Geräuscheinwirkungen in der Nachbarschaft“ (1997) [4] sowie DIN 45680 „Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen“ (Entwurf 2013) [5].

Zudem sollte ein netzspannungsunabhängiger Betrieb der Messstation über einen Zeitraum von zwei bis vier Wochen sichergestellt werden.

## 9.2 Konzept

Der Entwurf der Messstation sollte insbesondere deren technische Ausstattung, die Auswertung der Messdaten sowie die Bewertung der Ermittlungsergebnisse im Rahmen

des Immissionsschutzes umfassen. Prinzipiell gliedert sich die projektierte Dauermessstation in folgende Funktionsmodule:

- Einheit zur Erfassung der Betriebsparameter der Windkraftanlage
- Meteorologiemesseinheit
- Geräuschmesseinheit
- Geräteüberwachung (Fernwirkeinheit)
- Datenzentrale (Datenbank und Datenauswertung)

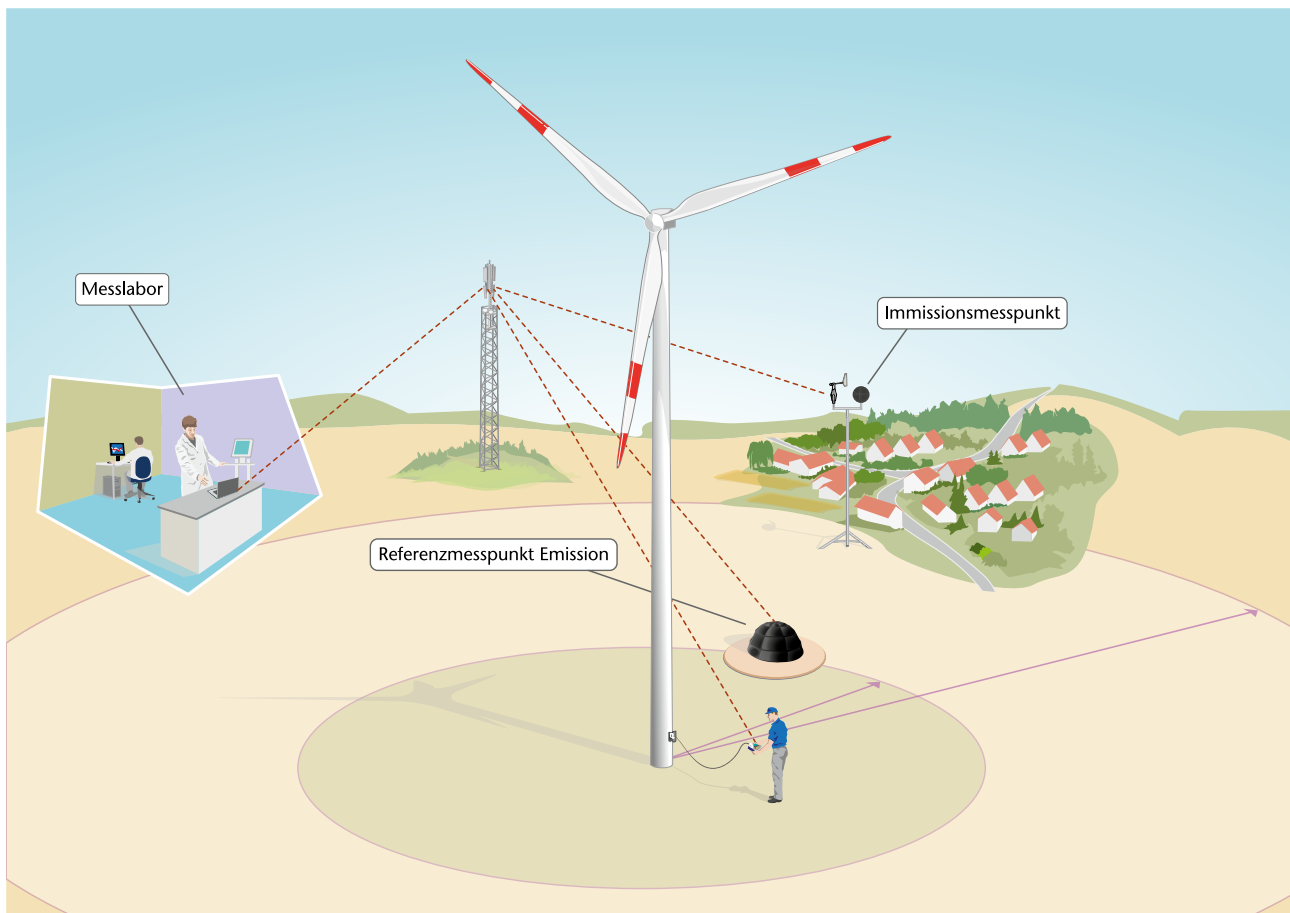
Sofern die Aufgabenstellung dies erfordert, könnte die Dauermessstation mehrere gleichartige Messeinheiten enthalten. Der prinzipielle Aufbau einer möglichen Dauermessstation ist in **Abbildung 9.2-1** dargestellt.

## 9.3 Einzelmodule zur Datenerfassung

### ANLAGEN- UND BETRIEBSPARAMETER

Näherungsweise können Aussagen zum Betriebszustand einer Windkraftanlage aus in Messortnähe ermittelten Winddaten abgeleitet werden. Dies gilt allerdings nicht für spezielle Betriebsarten der Anlage (z. B. lärmarmen Betrieb, Anlagenstillstand bei zum Betrieb nicht ausreichenden Windverhältnissen).

Belastbare Aussagen zum momentanen Betriebsverhalten einer Windkraftanlage erfordern die fortlaufende Ermittlung der tatsächlichen Anlagen- und Betriebsparameter, wie Anlagenleistung, Rotordrehzahl, Gondelwinkel, Blattwinkel, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. In der Regel zeichnet der Anlagenbetreiber bereits standardmäßig diese Parameter auf. Eine Übernahme dieser Betreiberdaten in das Kollektiv der von der Dauermessstation ermittelten Messdaten gestaltet sich in der Praxis allerdings oftmals als schwierig oder gar unmöglich. Deutlich sicherer, aber aufwändiger ist es, die Anlagenbetriebsdaten auf einem eigenen Erfassungssystem selbst aufzuzeichnen. Hierzu wären die Anlagensignale über Messumformer oder



**Abbildung 9.2-1:** Prinzipieller Aufbau einer möglichen Dauermessstation

vorhandene Schnittstellen aus der Anlagensteuerung der Windkraftanlage auszukoppeln und mittels geeigneten Datenloggers zu registrieren. Bei dieser Art der Ermittlung kann die Datenaufnahme (Abtastfolgen, Datenformate etc.) stets nach eigenem Standard erfolgen, eine optimale Datenintegration in das Gesamtsystem wäre gewährleistet. Die Unterstützung durch fachkundiges Personal beim Anschluss des Erfassungssystems an die Anlagensteuerung erscheint allerdings unerlässlich.

#### WETTERDATEN

Parallel zu den Geräuschemessdaten sind die meteorologischen Größen – mittlere Windgeschwindigkeit, mittlere Windrichtung (jeweils in 10 s Intervallen) – sowie Niederschlag, Lufttemperatur und Luftdruck zu ermitteln. Hierzu können handelsübliche, mit ausreichendem Datenspeicher ausgestattete Wetterstationen (Sensorik und Datenlogger) genutzt werden. Die erfassten meteorologischen Größen sind in der Datenzentrale mit den sonstigen Messdaten zu verknüpfen. Sofern gerätetechnisch möglich, könnte die

Aufzeichnung der meteorologischen Messdaten auch bereits vor Ort gemeinsam mit den Geräuschemessdaten im Schallpegelanalysator erfolgen. Die Winddaten sind in einer Höhe von bis zu 10 m über Boden zu erfassen. Entsprechende auch auf unebenem Gelände nutzbare Maste werden von mehreren Herstellern angeboten.

#### AKUSTISCHE DATEN

Zur Messung der akustischen Daten kann eine aus handelsüblichem Schallpegelanalysator und wechselbarer Mikrofoneinheit bestehende Gerätekombination genutzt werden. Soweit notwendig oder sinnvoll, können weitere Funktionseinheiten wie z. B. Steuereinheit, Monitoringsystem oder Meteorologieaufzeichnung enthalten oder angeschlossen sein. Grundsätzlich ist das Geräuschemesssystem zur Ermittlung von Emissionen (DIN EN 61400-11 [6]), Geräuschimmissionen (TA Lärm [10]) und tieffrequenter Geräusche (DIN 45680 [4]) geeignet. Folgende Spezifikationen sind von dem Schallpegelanalysator zu erfüllen:

- Eichfähiger Schallpegelmessgerät nach DIN EN 61672-1:2003 [22] Klasse 1, mit Standardmikrofon und Terzfiltern nach DIN EN 61260:2003 [23] Klasse 1
- Nutzbarer Pegelbereich: 18 dB(A) bis 110 dB(A), nutzbarer Frequenzbereich: 1 Hz bis 20 kHz
- Fortlaufende Erfassung unterschiedlicher Schallpegel ( $L_{Aeq}$ ,  $L_{AFmax}$ ,  $L_{Ceq}$ ,  $L_{CFmax}$ ,  $L_{TerzAeq}$ ,  $L_{TerzAFmax}$ ) in Periodendauern von 0,1 s bis 10 s
- Fortlaufende Erfassung des Audiosignals und stündliche Ablage als WAV-Datei. Der Datenspeicher muss für Aufzeichnungen über mindestens 2 Wochen, bei eingeschränktem Frequenzbereich der Audioaufnahme für Aufzeichnungen über mindestens 4 Wochen ausreichen
- Umfangreiches Trigger-Management (Zeitgesteuerte Triggerung und externe Triggermöglichkeit)
- Alternativ nutzbares Infrasschallmikrofon (untere Grenzfrequenz  $\leq 1$  Hz, Unsicherheit bei 1 Hz  $\leq \pm 3$  dB)
- Zusätzliche wetterfeste Mikrofonplatte mit Primär- und Sekundärwindschirme nach DIN EN 61400-11 [6]
- Zusätzliche Primär- und Sekundärwindschirme zur Montage auf Stativ oder Messmast für Immissionsmessungen nach TA Lärm [10]

#### GERÄTEÜBERWACHUNG

Idealerweise sollte die Möglichkeit gegeben sein, alle Messsysteme drahtlos über eine Ethernet- oder GSM-Verbindung von der Datenzentrale aus zu überwachen und zu steuern. Sofern es die Datenverbindung zulässt, sollte auch eine Übertragung der gespeicherten Messdaten zur Datenzentrale möglich sein.

Zur Erhöhung der Transparenz des jeweiligen Messprojektes, könnte auch eine Echtzeitdarstellung der Messergebnisse auf einer öffentlich zugänglichen Internetseite ermöglicht werden.

#### ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN

Generell sind alle Geräte der Dauermessstation unabhängig vom öffentlichen Stromversorgungsnetz mit 12 V Gleichspannung zu betreiben. Die Messstation ist mit entsprechenden Energieversorgungseinheiten auszustatten. Ein wartungsfreier Dauerbetrieb über vier Wochen ist hierbei zu gewährleisten. Grundsätzlich sollte die Dauermessstation witterungsbeständig ausgelegt werden. Soweit not-

wendig, sind alle Teile ausreichend vor Witterungseinflüssen (Niederschlag, Sonne, Wind) zu schützen. Ein Betrieb im Lufttemperaturbereich von  $-5$  °C bis  $+30$  °C ist zu ermöglichen. Die Dauermessstation muss mit Sicherungseinrichtungen gegen Beschädigung durch Tiere, gegen Vandalismus und gegen Diebstahl ausgestattet werden.

### 9.4 Zentrale Datenauswertung

Die Auswertung der vor Ort erfassten Messdaten und deren Zusammenstellung zu Messberichten erfolgt in der Regel nach Beendigung der Messungen in der Datenzentrale. Die Art und der Umfang der Auswertung richten sich dabei nach der vorgegebenen Aufgabenstellung. Die eigentliche Datenauswertung kann weitgehend automatisiert erfolgen; Auswerteprogramme hierzu sind kommerziell erhältlich. Bei der Auswertung sind insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Datenaufbereitung: Benötigte, vor Ort nicht bestimm- bare Einzeldaten können aus den Messdaten oder den Audioaufnahmen abgeleitet werden. (z.B. G-bewertete Geräuschpegel, Schmalbandfrequenzanalysen, Tonhaltigkeiten, Impulshaltigkeiten).
- Datensynchronisation: Die teils in unterschiedlichem Zeitraster ermittelten Einzelwerte der Anlagendaten, meteorologischen Messwerte und akustischen Messwerte sind für gleiche Periodenlängen (z. B. 10 s) zu verdichten und auf gleiche absolute Zeitpunkte zu synchronisieren.
- Störungsbeseitigung: Wirken am Messort gleichzeitig mit den Geräuschen der Windkraftanlage auch Fremdgeräusche ein, könnte dies zu Fehleinschätzungen der Geräuschsituation führen. Die Pegel der durch Fremdquellen beeinflussten Geräusche sind daher bei der Ermittlung der Anlagengeräuschpegel auszuschließen. Dies setzt eine umfassende, auf jeden Einzelfall abgestimmte Plausibilitätsprüfung aller Messdaten voraus. Impulsartige Fremdgeräusche können oftmals anhand des Pegelverlaufs gut erkannt werden, andauernde Fremdgeräuschstörungen lassen sich häufig nur anhand der Pegelverläufe einzelner Frequenzbänder erkennen. Im Zweifelsfall ist das Abhören der Audioaufzeichnungen erforderlich.

## 9.5 Anwendbarkeit und Nutzen

Die betroffene Bevölkerung steht prognostizierten Geräuschpegelwerten oder innerhalb nur weniger Stunden gemessenen Messwerten von Windkraftanlagen oftmals misstrauisch gegenüber. So gehen Betroffene häufig davon aus, dass die standardmäßig genutzten Ermittlungsverfahren nicht alle Facetten möglicher Belästigungswirkungen berücksichtigen. Auch wird vermutet, dass nicht die ungünstigste Betriebsart der Windkraftanlage den Geräuschermittlungen zugrunde lag. In solchen Fällen bietet sich der Einsatz einer Geräuschkauermessstation an. Zur Erhöhung deren Akzeptanz könnte die Bevölkerung auch in das Ermittlungsverfahren eingebunden werden.

### EINSATZMÖGLICHKEITEN

- Ermittlung der durch Windkraftanlagen verursachten Geräuschemissionen und Immissionen in Abhängigkeit von Wind- und Anlagenbetriebsverhältnissen. Erstellung unterschiedlicher Statistiken zum Geräuschaufkommen, Anlagenparametern oder Windverhältnissen.
- Vergleich der Ermittlungsergebnisse mit den Richt- und Anhaltswerten der TA Lärm und der DIN 45680 [4, 5] sowie mit im Genehmigungsverfahren genutzten bzw. vorgegeben Pegelwerten.
- Ermittlung des an einem Messort einwirkenden Infraschalls, ggf. in Abhängigkeit von Wind- und Anlagenbetriebsverhältnissen.
- Ermittlung der Geräuscheinwirkungen an einem Ort vor und nach Inbetriebnahme von Windkraftanlagen.
- Ermittlung spezieller oder nicht regelmäßig auftretender Geräusche oder Geräuscheffekte, bspw. durch Beschwerdeführer gesteuert.
- Letztlich könnte der Betrieb einer solchen Dauermessstation als Beitrag zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Geräuscheinwirkungen und insbesondere als Beitrag zur Befriedung der Konfliktsituation vor Ort angesehen werden.
- Nicht geeignet ist der Einsatz der Dauermessstation zur Durchführung von Abnahmemessungen. Solche Messungen erfordern einer direkten Begleitung durch fachkundiges Personal.

# Anhang A1 – Allgemeine Informationen

In den folgenden Abschnitten werden Informationen über Infraschall und tieffrequente Geräusche in möglichst allgemein verständlicher Form dargestellt. Dabei geht es um Entstehung, Vorkommen, Ausbreitung aber auch um Bewertung und Wahrnehmung von Infraschall und tieffrequentem Schall [15] [19] [24] [25] [26] [27] [28].

## A1.1 TIEFFREQUENTE GERÄUSCHE UND INFRASCHALL

Schall besteht, einfach gesagt, aus Druckwellen. Bei einer Ausbreitung dieser Druckschwankungen in der Luft spricht man von Luftschall. Der Hörsinn des Menschen ist in der Lage, Schall zu erfassen, dessen Frequenz (zum Begriff siehe Anhang A3) zwischen rund 20 Hz und etwa 16 000 Hz (bei Kindern etwa 20 000 Hz) liegt. Niedrige Frequenzen entsprechen den tiefen, große den hohen Tönen. Schall unterhalb des Hörbereichs, also mit Frequenzen von weniger als 20 Hz, nennt man Infraschall. Geräusche oberhalb des Hörbereichs, also mit Frequenzen über 20 000 Hz, sind als Ultraschall bekannt. Als tieffrequent bezeichnet man Geräusche, wenn ihre vorherrschenden Anteile im Frequenzbereich unter 100 Hz liegen. Infraschall ist also ein Teil des tieffrequenten Schalls.

Die periodischen Druckschwankungen der Luft breiten sich mit der Schallgeschwindigkeit von rund 340 Metern pro Sekunde aus. Schwingungen niedriger Frequenz haben große, hochfrequente Schwingungen haben kleine Wellenlängen. Beispielsweise beträgt die Wellenlänge eines 20-Hz-Tones in Luft etwa 17 m, während einer Frequenz von 20 000 Hz die Wellenlänge 1,7 cm entspricht (siehe **Tabelle A1-1**).

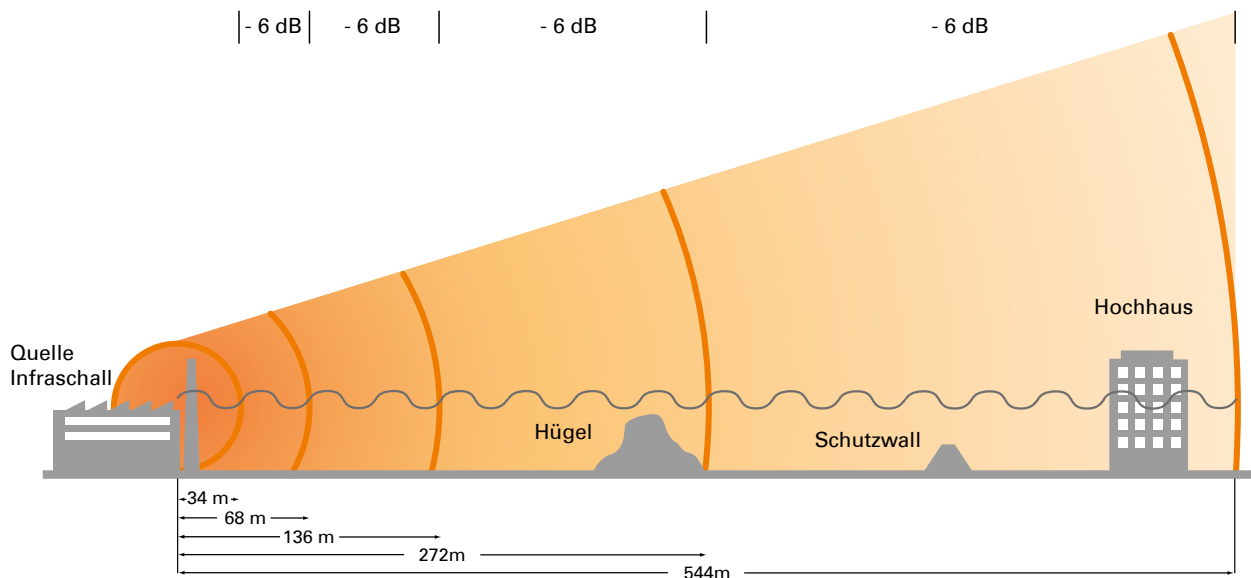
## A1.2 AUSBREITUNG

Die Ausbreitung von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen erfolgt nach denselben physikalischen Gesetzen wie bei jeder Art von Luftschall. Eine einzelne Schallquelle wie z. B. der Generator einer Windenergieanlage strahlt Wellen ab, die sich in alle Richtungen kugelförmig ausbreiten (**Abbildung A1-1**). Da sich die Schallenergie dabei auf immer größer werdende Flächen verteilt, nimmt die Schallintensität pro Quadratmeter im umgekehrten Verhältnis ab: Mit zunehmendem Abstand wird es rasch leiser (pro Entfernungsverdoppelung etwa um 6 dB). Daneben gibt es den Effekt der Absorption des Schalls durch die Luft. Ein kleiner Teil der Schallenergie wird bei der Wellenausbreitung in Wärme umgewandelt, wodurch eine zusätzliche Dämpfung erfolgt. Diese Luftabsorption ist von der Frequenz abhängig: Tieffrequenter Schall wird wenig, hochfrequenter Schall stärker gedämpft. Im Vergleich überwiegt die Abnahme des Schallpegels mit der Entfernung gegenüber der Luftabsorption deutlich. Bei der Ausbreitung über ebenen Flächen können sich Interferenzen ausbilden, die zu stark schwankenden Schallpegeln führen. Vor ausgedehnten Hindernissen kann es zu einem Druckstau kommen und damit zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels. Zwischen Gebäudefassaden können im Außenbereich stehende Wellen entstehen. Eine Besonderheit besteht außerdem in der vergleichsweise geringen Dämmung tieffrequenter Schallwellen durch Wände oder Fenster, so dass Einwirkungen auch im Innern von Gebäuden auftreten. Auch hier kann es zur Ausbildung stehender Wellen kommen. Im Infraschallbereich können diese jedoch nur in großen Hallen oder Kirchen entstehen; in üblichen Wohnräumen liegen die Grundschrwingungen bei höheren Frequenzen.

**Tabelle A1-1:** Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge für Schallwellen in der Luft

Frequenz	1 Hz	10 Hz	20 Hz	50 Hz	100 Hz	2 000 Hz
Wellenlänge	340 m	34 m	17 m	6,8 m	3,4 m	17 cm





**Abbildung A1-1:** Beispielhafte Darstellung der Ausbreitung von Infraschall mit einer Frequenz von 10 Hz. Die zugehörige Wellenlänge von 34 m ist größer als Wohnhäuser, Bäume und Schutzwälle hoch sind. Deshalb dämpfen diese den Schall kaum. Der Schalldruckpegel sinkt jedoch unabhängig davon nach demselben Gesetz wie beim Hörschall: Jede Verdoppelung des Abstands von der Quelle führt zu einer Schallpegelabnahme um 6 dB. Bildquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt [15]

### A1.3 AUFTRETEN UND VORKOMMEN

Infraschall und tieffrequente Geräusche sind alltägliche Bestandteile unserer Umwelt. Sie werden von einer großen Zahl unterschiedlicher Quellen erzeugt. Dazu gehören natürliche Quellen wie Wind, Wasserfälle oder Meeresbrandung ebenso wie technische, beispielsweise Heizungs- und Klimaanlage, der Straßen- und Schienenverkehr, Flugzeuge oder Lautsprechersysteme in Diskotheken und viele mehr.

### A1.4 BEWERTUNG

Die Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche sind in der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm [10], siehe dort das Kapitel 7.3 und den Anhang A1.5) sowie in der Norm DIN 45680 [4] geregelt. Auf Grundlage dieser Vorschriften lassen sich die Geräuscheinwirkungen sicher ermitteln. Dabei wird der Frequenzbereich von 8 Hz bis 100 Hz berücksichtigt. Maßgeblich für mögliche Belästigungen ist die Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle des Menschen, die in der Norm dargestellt ist. Siehe hierzu auch den nächsten Abschnitt.

Für den Bereich des Infraschalls gibt es eine eigene Frequenzbewertung, die so genannte G-Bewertung. Entsprechend bewertete Pegel werden als dB(G) – „Dezibel G“ – angegeben. Bekannt ist die A-Bewertung von Geräuschen als dB(A) – „Dezibel A“ –, die dem Hörempfinden des Menschen nachempfunden ist. Die G-Bewertung hat ihren Schwerpunkt bei 20 Hz. Zwischen 10 Hz und 25 Hz werden Pegel verstärkt, darunter und darüber fällt die Bewertungskurve rasch ab. Zweck der G-Bewertung ist es, eine Situation im Hinblick auf tiefe Frequenzen bzw. Infraschall mit einer einzigen Zahl zu charakterisieren. Ein Nachteil ist, dass Frequenzen unterhalb 8 Hz und oberhalb 40 Hz kaum mehr einen Beitrag leisten. Weitere Informationen siehe unter „Frequenzbewertung“ im Anhang A3, dort ist auch die Bewertungskurve abgebildet (**Abbildung A3-1**).

### A1.5 WAHRNEHMUNG

Im Bereich des tieffrequenten Schalls unterhalb 100 Hz gibt es einen fließenden Übergang vom Hören, also von den Sinneseindrücken Lautstärke und Tonhöhe, hin zum Fühlen. Hier ändert sich die Qualität und Art der Wahrnehmung. Die Tonhöhenempfindung nimmt ab und ent-

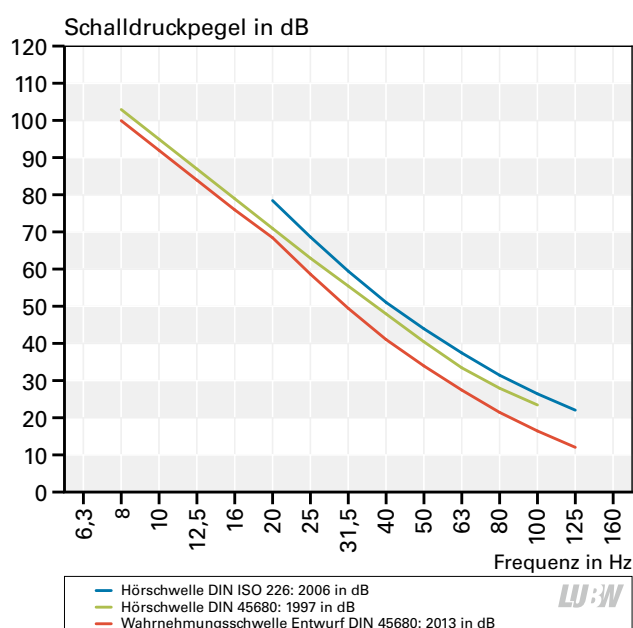
**Tabelle A1-2:** Hör- und Wahrnehmungsschwellen (in Dezibel) im Bereich des Infraschalls. Je tiefer die Frequenz ist, desto lauter muss ein Geräusch bzw. desto höher muss die Schallintensität sein, damit ein Mensch noch etwas wahrnimmt. Bei 8 Hz muss der Schalldruckpegel bei 100 Dezibel liegen. Am besten hört der Mensch im Bereich von 2 000 und 5 000 Hz, dort liegt die mittlere Hörschwelle bei 0 Dezibel und sogar darunter (bis minus 5 Dezibel).

Frequenz (als Terzmittenfrequenz)	8 Hz	10Hz	12,5Hz	16Hz	20Hz
<b>Hörschwelle</b> nach DIN 45680 (1997) [4]	103 dB	95 dB	87 dB	79 dB	71 dB
<b>Wahrnehmungsschwelle</b> nach Entwurf DIN 45680 (2013) [5]	100 dB	92 dB	84 dB	76 dB	69 dB

LUBW

fällt beim Infraschall ganz. Generell gilt: Je niedriger die Frequenz, desto höher muss die Schallintensität sein, damit das Geräusch überhaupt gehört wird (siehe **Tabelle A1-2**). Tieffrequente Einwirkungen hoher Intensität werden häufig als Ohrendruck und Vibrationen wahrgenommen. Bei dauerhafter Einwirkung solch hoher Schallpegel können Dröhn-, Schwingungs- oder Druckgefühle im Kopf entstehen. Neben dem Hörsinn können auch andere Sinnesorgane tieffrequenten Schall registrieren. So vermitteln etwa die Sinneszellen der Haut Druck- und Vibrationsreize. Infraschall kann auch auf im Körper vorhandene Hohlräume wie Lunge, Nasennebenhöhlen und Mittelohr wirken. Infraschall sehr hoher Intensität hat eine maskierende Wirkung für den mittleren und unteren Hörbereich. Das bedeutet: Bei sehr starkem Infraschall ist das Gehör nicht in der Lage, gleichzeitig leise Töne bei darüber liegenden Frequenzen wahrzunehmen.

Doch wo liegt die Grenze zwischen Hören, Spüren und Nicht-mehr-wahrnehmen? **Tabelle A1-2** zeigt einige Pegel der Hör- und Wahrnehmungsschwellen bei unterschiedlichen Frequenzen. Die Hörschwelle der DIN 45680 (1997) [4] ist dabei so festgelegt, dass 50 % der Bevölkerung die jeweilige Frequenz unterhalb des angegebenen Pegels nicht mehr hörbar wahrnimmt. Die Wahrnehmungsschwelle der DIN 45680 (2013) [5] ist so definiert, dass 90 % der Menschen unterhalb dieses Pegels den Schall nicht mehr wahrnehmen. Die Grenze, ab der tieffrequenter Schall gehört werden kann, variiert von Mensch zu Mensch. Dies ist nichts ungewöhnliches, kennt man das doch vom Hörschall im Alltag ebenso. Für fast 70 % der Personen liegt deren Hörschwelle in einem Bereich von  $\pm 6$  dB um die in **Tabelle A1-2** angegebenen Werte. Bei besonders sensiblen Personen, mit einem Anteil von rund zwei bis drei Prozent an der Gesamtbevölkerung, ist die Hörschwelle um mindestens 12 dB niedriger. **Abbildung A1-2** zeigt die Verhältnisse der beiden Schwellen nochmals grafisch. Die Unterschiede sind relativ gering.



**Abbildung A1-2:** Darstellung der Hör- und Wahrnehmungsschwellen nach ISO 226 [29], DIN 45680 (1997) [4] und Entwurf DIN 45680 (2013) [5]. Die Wahrnehmungsschwelle nach dem Entwurf der DIN 45680 liegt um 10 dB unter den Werten der ISO 226.

Laboruntersuchungen über Einwirkungen durch Infraschall weisen nach, dass hohe Intensitäten oberhalb der Wahrnehmungsschwelle ermüdend und konzentrationsmindernd wirken und die Leistungsfähigkeit beeinflussen können. Die am besten nachgewiesene Reaktion des Körpers ist zunehmende Müdigkeit nach mehrstündiger Exposition. Auch das Gleichgewichtssystem kann beeinträchtigt werden. Manche Versuchspersonen verspürten Unsicherheits- und Angstgefühle, bei anderen war die Atemfrequenz herabgesetzt. Weiterhin tritt, wie auch beim Hörschall, bei sehr hoher Schallintensität eine vorübergehende Hörminderung auf – ein Effekt, wie er z. B. von Diskothekenbesuchen bekannt ist. Bei langfristiger Einwirkung von starkem Infraschall können auch dauerhafte Hörschäden auftreten. Die im Umfeld von Windenergieanlagen auftretenden Infraschallpegel sind von solchen Wirkungseffekten aber

weit entfernt, die Hör- bzw. Wahrnehmungsschwelle wird deutlich unterschritten. Gesundheitliche Wirkungen ließen sich in der wissenschaftlichen Literatur bisher nur bei Schallpegeln oberhalb der Hörschwelle zeigen. Unterhalb der Hörschwelle konnten bisher keine Wirkungen des Infraschalls auf den Menschen belegt werden [25].

# Anhang A2 – Quellen und Literatur

- [1] Windenergieerlass Baden-Württemberg – Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (und weiterer Ministerien) vom 09.05.2012, Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg vom 30.05.2012, Ausgabe 2012, Nr. 7, S. 413-441, Internet: [um.baden-wuerttemberg.de](http://um.baden-wuerttemberg.de), im Suchfeld „Windenergieerlass“ eingeben
- [2] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943) geändert worden ist. Internet: <http://www.gesetze-im-internet.de/bimsg>
- [3] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 3756). Internet: [http://www.gesetze-im-internet.de/bimsv\\_4\\_2013/BjNR097310013.html](http://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_4_2013/BjNR097310013.html)
- [4] DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft (mit Beiblatt), Ausgabedatum 1997-03
- [5] DIN 45680: Entwurf: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen (September 2013), Ausgabedatum 2013-09, in Bezug auf die Wahrnehmungsschwelle identisch mit Entwurf 2011-08
- [6] IEC 61400-11: Acoustic noise measurement techniques, Edition 2.1, Ausgabedatum 2006-11 – deutsche Fassung: DIN EN 61400-11: Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmessverfahren, Ausgabedatum 2013-09
- [7] Technische Richtlinie für Windenergieanlagen, Teil 1: Bestimmung der Schallemissionswerte, Revision 18 Stand 01.02.2008, Herausgeber: FGW Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien e. V.
- [8] DIN 45645: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Ausgabedatum 1996-07
- [9] ISO 7196: Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements, Ausgabedatum 1995-03
- [10] Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26. August 1998 (TA Lärm), GMBL 1998 Nr. 26, S. 503-516, Internet: [http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_26081998\\_IG19980826.htm](http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26081998_IG19980826.htm)
- [11] MØLLER H. & PEDERSEN C. S. (2004): Hearing at low and infrasonic frequencies, Noise & Health, Vol. 6, Issue 23, S. 37-57
- [12] DIN 45669: Messung von Schwingungsmissionen Teil 1: Schwingungsmesser – Anforderungen und Prüfungen, Ausgabedatum 2010-09; Teil 2: Messverfahren, Ausgabedatum 2005-06
- [13] DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Ausgabedatum 2001-06; Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Ausgabedatum 1999-06; Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Ausgabedatum 1999-02
- [14] HENKEMEIER F. & BUNK O. (2010): Schalltechnischer Bericht Nr. 27257-1.006 über die Ermittlung und Beurteilung der anlagenbezogenen Geräuschimmissionen der Windenergieanlagen im Windpark Hohen Pritz, Mai 2010, Messungen der Fa. Kötter, im Auftrag des Landes Mecklenburg-Vorpommern, Landesamt für Umweltschutz, Naturschutz und Geologie (LUNG), Rheine, Internet: <http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/infraschall.pdf>
- [15] Bayerisches Landesamt für Umwelt & Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (2014): Windkraftanlagen – beeinträchtigt Infraschall die Gesundheit?, Augsburg/Erlangen, Internet: [http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw\\_117\\_windkraftanlagen\\_infraschall\\_gesundheit.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_117_windkraftanlagen_infraschall_gesundheit.pdf)
- [16] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2000): Langzeit-Geräuschimmissionsmessung an der 1 MW-Windenergieanlage Nordex N54 in Wiggenbach bei Kempten (Bayern),

Augsburg, Internet: <http://www.lfu.bayern.de/laerm/messwerte/doc/windenergieanlage.pdf>

- [17] MØLLER H. & PEDERSEN C. S. (2010): Low-frequency noise from large wind turbines, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129, No. 6, June 2011, S. 3727-3744
- [18] EPA – Environment Protection Authority South Australia & Resonate Acoustics (2013): Infrasound levels near wind-farms and in other environments, Adelaide, Internet: [www.epa.sa.gov.au/files/477912\\_infrasound.pdf](http://www.epa.sa.gov.au/files/477912_infrasound.pdf)
- [19] BORGMANN R. (2005): Leitfaden Nichtionisierende Strahlung – Infraschall, Fachverband für Strahlenschutz, Garching, Internet: [www.fs-ev.org](http://www.fs-ev.org)
- [20] BETKE K. & REMMERS H. (1998): Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall, in: Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA) (Hrsg., 1998): Fortschritte der Akustik, Tagungsband der Deutschen Akustiktagung 1998, Oldenburg, Internet: <http://www.itap.de/wp-content/uploads/2015/11/tieffrequent.pdf>
- [21] TURNBULL C., TURNER J. & WALSH D. (2012): Measurement and Level of Infrasound from Windfarms and other sources, *Acoustics Australia*, Vol. 40, No. 1, April 2012, S. 45-50
- [22] DIN EN 61672-1: Elektroakustik – Schallpegelmesser, Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013, Ausgabedatum 2014-07
- [23] DIN EN 61260: Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven (IEC 61260:1995 + A1:2001); Dt. Fassung EN 61260:1995 + A1:2001, Ausgabedatum 2003-03
- [24] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2015): Windenergie und Infraschall – Tieffrequente Geräusche durch Windenergieanlagen, 6. Auflage Oktober 2015, Karlsruhe, Internet: [www.lubw.de/servlet/is/223628](http://www.lubw.de/servlet/is/223628)
- [25] TWARDELLA D. (2013): Bedeutung des Ausbaus der Windenergie für die menschliche Gesundheit, in: UMID Umwelt und Mensch – Informationsdienst, S. 14-18, Internet: [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/360/publikationen/umid\\_03\\_2013\\_internet\\_neu.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/360/publikationen/umid_03_2013_internet_neu.pdf)
- [26] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2015): Fragen und Antworten zu Windenergie und Schall – Behauptungen und Fakten, Karlsruhe, Internet: [www.lubw.de/servlet/is/255800](http://www.lubw.de/servlet/is/255800)
- [27] Robert Koch-Institut (2007): Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland?, *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, Nr. 50, S. 1582-1589, Internet: <http://www.rki.de/DE/Content/Kommissionen/UmweltKommission/Archiv/Schall.pdf>
- [28] HA Hessen Agentur GmbH im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (2015): Faktenpapier Windenergie und Infraschall, Internet: [www.energieland.hessen.de/faktenpapier\\_infraschall](http://www.energieland.hessen.de/faktenpapier_infraschall)
- [29] DIN ISO 226: Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel, Ausgabedatum 2006-04
- [30] ISO 7196: Akustik – Frequenzbewertungs-Charakteristik für Infraschallmessungen, Ausgabedatum 1995-03
- [31] DIN 45641: Mittelung von Schallpegeln, Ausgabedatum 1990-06
- [32] HAU E. (2014): Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 5. Auflage, Berlin/Heidelberg
- [33] WEINHEIMER J. (2014): Höhere Schalleistungspegel von Windenergieanlagen bei höherer Turbulenz?, in: Kötter Consulting Engineers (Hrsg., 2014): Good Vibrations, Windenergie – Bauphysik – Immissionsschutz, September 2014, S. 2/3, Internet: [http://www.koetter-consulting.com/coRED/\\_data/149-14\\_gv\\_71\\_versand.pdf](http://www.koetter-consulting.com/coRED/_data/149-14_gv_71_versand.pdf)
- [34] WATANABE T. & MØLLER H. (1990): Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field, *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, Vol. 9, No. 3, S. 106-115

# Anhang A3 – Erläuterung von Begriffen und Größen

## **A-Bewertung**

Frequenzabhängige Veränderung eines Geräusch- bzw. Schallsignals mittels A-Filter nach DIN EN 61672-1:2003 [22]. Siehe auch Frequenzbewertung und dB(A).

## **Betriebsgeräusch**

Geräusch bei eingeschalteter Windenergieanlage einschließlich des Hintergrundgeräusches. Wird im Bericht durchgängig als Gesamtgeräusch bezeichnet.

## **C-Bewertung**

Frequenzabhängige Veränderung eines Geräusch- bzw. Schallsignals mittels C-Filter nach DIN EN 61672-1:2003 [22]. Siehe auch Frequenzbewertung und dB(C).

## **dB**

Dezibel, Maßeinheit zur Kennzeichnung von Pegeln, hier Schalldruckpegel (siehe dort).

## **dB(A)**

Dezibel A, Einheit des Schalldruckpegels in A-Bewertung. Siehe auch Schalldruckpegel und A-Bewertung.

## **dB(C)**

Dezibel C, Einheit des Schalldruckpegels in C-Bewertung. Siehe Schalldruckpegel und C-Bewertung.

## **dB(G)**

Dezibel G, Einheit des Schalldruckpegels in G-Bewertung, wird insbesondere bei tieffrequenten Geräuschen inkl. Infraschall angewendet. Siehe auch Schalldruckpegel und G-Bewertung.

## **dB(Z)**

Dezibel Z, Einheit des Schalldruckpegels in Z-Bewertung, entspricht dem frequenzmäßig unbewerteten, linearen Schalldruckpegel. Früher auch als dB(lin) bezeichnet.

## **Emission**

Siehe Schallemission

## **Erschütterungen**

Erschütterungen sind Schwingungen von festen Körpern.

## **Erschütterungsimmission**

Erschütterungsimmissionen sind die am Messort auftretenden Schwingungen

## **Fremdgeräusch**

Geräusche, die nicht von der zu beurteilenden Anlage verursacht werden und zeitweilig zu einer Überhöhung des Hintergrundgeräusches führen. Störende Fremdgeräusche werden durch Setzen von Markern von der Auswertung ausgeschlossen und sind daher weder im dargestellten Gesamtgeräusch noch im Hintergrundgeräusch enthalten.

## **Frequenz**

Anzahl der Schwingungen pro Sekunde; die Einheit ist Hertz (Hz). Der gesamte wahrnehmbare Frequenzbereich untergliedert sich in:

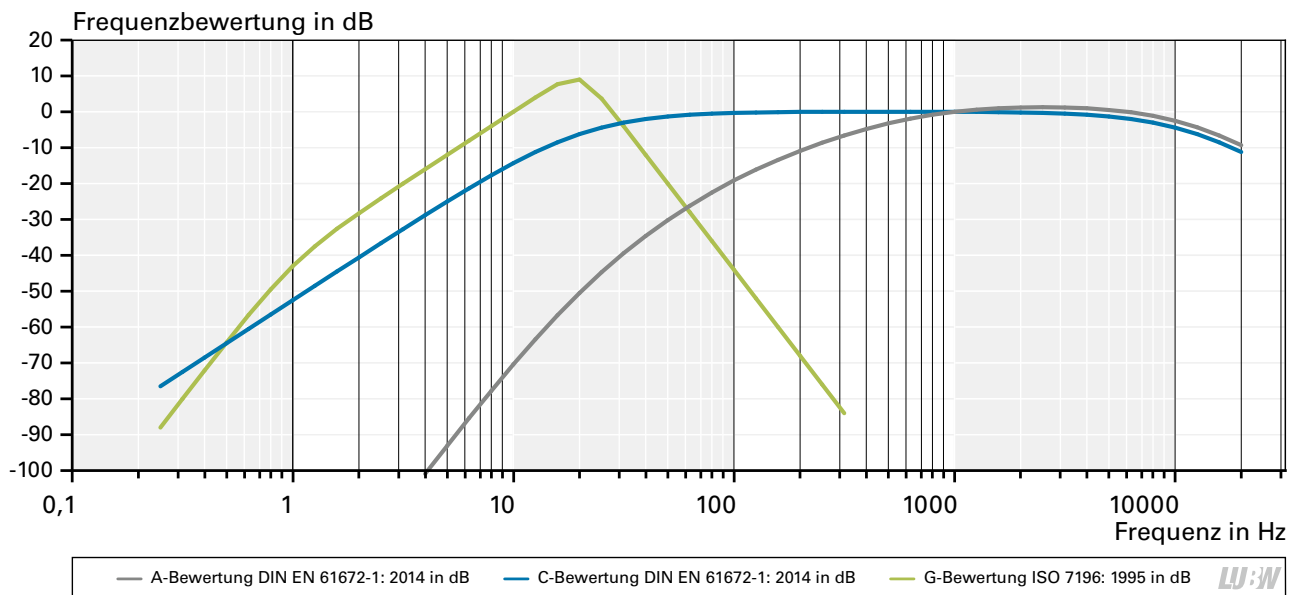
- Infraschall: Schall mit Frequenzen unterhalb von 20 Hz
- Hörschall: Schall im Bereich zwischen 20 Hz und etwa 16 000 Hz (Grenze ist altersabhängig)
- Ultraschall: Schall oberhalb etwa 16 000 Hz
- Tieffrequente Geräusche: Schall im Frequenzbereich unterhalb 100 Hz, einschließlich Infraschall

## **Frequenzbewertung (Geräusche)**

Die Frequenzanteile von Geräuschen werden je nach Fragestellung unterschiedlich bewertet. In dieser Untersuchung werden neben den allgemein üblichen A-bewerteten auch C- bewertete, G- bewertete und Z-bewertete Geräuschpegel ermittelt und dargestellt.

Die Frequenzbewertung A wird standardmäßig zur Bewertung der Schallsignale im normalen Hörschallbereich genutzt. Sie bildet näherungsweise das Hörempfinden des menschlichen Ohres im niedrigen und mittleren Lautstärkebereich nach. Im Allgemeinen erfolgt die Beschreibung und Bewertung von Geräuschemissionen und -immissionen anhand A-bewerteter Pegel. Die Beurteilung tieffrequenter Geräusche inkl. Infraschalls erfordert gesonderte





**Abbildung A3-1:** Verlauf der Frequenzbewertungskurven A, C und G im Bereich unterhalb von 500 Hz nach ISO 7196 und DIN EN 61672-1 (2013) [22]

Einschränkungen der Frequenzbereiche; A-bewertete, über das gesamte Frequenzband ermittelte Schallpegel sind hierzu ungeeignet.

Die Frequenzbewertung C entspricht näherungsweise der Hörempfindung des Ohres bei hohen Lautstärken. Sie kommt insbesondere bei der Bewertung von Geräuschspitzen im Arbeitsschutz zur Anwendung. Zudem wird die Pegeldifferenz gemessener C-bewerteter und A-bewerteter Pegel immissionsschutzrechtlich als Indikator für mögliche tieffrequente Geräuschbelastungen betrachtet.

Mit der Frequenzbewertung G wurde ein Filter zur Wirkungsanpassung von Infraschall definiert, dessen Schwerpunkt bei 20 Hz liegt (siehe Abbildung A3-1). Allerdings sind keine einschlägigen Bezugs- oder Vergleichswerte zur quantitativen Einordnung etwaiger Infraschallwirkungen bzw. ermittelter G-bewerteter Pegel bekannt.

Unter der Frequenzbewertung Z (Zero) wird ein linearer Bandpassfilter ohne jegliche Frequenzbeeinflussung verstanden.

#### Frequenzspektrum

Siehe Spektralanalyse

#### G-Bewertung

Frequenzabhängige Veränderung eines Geräusch- bzw. Schallsignals mittels G-Filter nach ISO 7196:1995 [30]. Siehe Frequenzbewertung und dB(G).

#### Gesamtgeräusch

Geräusch bei eingeschalteter Windenergieanlage einschließlich des Hintergrundgeräusches. Im Bericht auch als Betriebszustand „Anlage ein“ angegeben.

#### Hintergrundgeräusch

Geräusch bei abgeschalteter Windenergieanlage. Es besteht vor allem aus dem vom Wind in der Umgebung erzeugten Schall und aus Geräuschen weiterer in der Umgebung vorhandener Geräuschquellen. Gegebenenfalls umfasst das Hintergrundgeräusch auch Schall, der vom Wind am Mikrofon induziert wird. Im Bericht auch als Betriebszustand „Anlage aus“ angegeben.

#### Hörschwelle

Siehe Anhang A1.5

#### Immission

Siehe Schallimmission

#### Infraschall

Siehe Anhang A1.1

## Lärm

Lärm kann als unerwünschter, störender, oder belästigender Schall aufgefasst werden. Während Schall als physikalisches Phänomen gut mess- und charakterisierbar ist, kommen beim Lärm das menschliche Empfinden mit ins Spiel.

## $L_{eq}$

Energieäquivalenter Mittelwert des (zeitlich veränderlichen) Schalldruckpegelverlaufs innerhalb eines Bezugszeitraums. Siehe auch Schalldruckpegel.

## $L_{max}$

Maximaler Schalldruckpegel in einem Messintervall. Siehe auch Schalldruckpegel.

## Mittelungspegel

Siehe Schalldruckpegel

## Pegel

Logarithmus des Verhältnisses zweier gleichartiger Größen. Beim Schalldruckpegel wird das Verhältnis des Schalldrucks, welcher durch ein Geräusch verursacht wird, zu einer festen Bezugsgröße (Hörschwelle) gebildet. Siehe auch Schalldruckpegel.

## Schall

Schall (Geräusch) besteht, vereinfacht gesagt, aus Druckwellen. Luftschall ist die Fortpflanzung von Druckschwankungen in der Luft als Wellenbewegung. Geschieht dies in festen Stoffen wie z. B. im Boden oder in Wänden, spricht man von Körperschall. Um Schall zu charakterisieren, sind Größen wie der Schallpegel (kennzeichnet die Stärke des Schalls) oder Frequenz (kennzeichnet die Tonhöhe) notwendig.

## Schallemission

Die von einer Anlage ausgehenden Geräusche gemäß § 3 Abs. 3 BImSchG [2]

## Schallimmission

Die auf Menschen, Tiere, ... einwirkenden Geräusche gemäß § 3 Abs. 2 BImSchG [2]

## Schalldruckpegel $L$

Vereinfacht oft als Schallpegel bezeichnet. 20-facher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses eines gegebenen Effektivwertes des Schalldrucks zu einem Bezugsschalldruck (z. B. Hörschwelle), wobei der Effektivwert des Schalldrucks mit einer genormten Frequenz- und Zeitbewertung ermittelt wird ( $L$  in dB). Schalldruckpegel des normalen Hörbereiches werden überwiegend mit der Frequenzbewertung  $A$  und der Zeitbewertung  $F$  nach DIN EN 61672-1 [22] ermittelt (siehe auch Frequenzbewertung). Die Arten der Frequenz- und Zeitbewertung werden in der Regel als Indizes des Formelzeichens angegeben, z. B.  $L_{AF}$  in dB(A). Die Definition des Schalldruckpegels  $L$  bei einem Schalldruck  $p$  lautet:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{p^2}{p_0^2} \text{ (dB)} = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \text{ (dB)}$$

Dabei ist  $p_0$  ein Bezugsschalldruck im Bereich der Hörschwelle, definiert als  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Schallpegelunterschiede von 1 dB sind gerade noch, 3 dB sind deutlich wahrnehmbar. Schallpegelunterschiede von 10 dB entsprechen etwa dem doppelten bzw. dem halben Lautheitseindruck.

- Die Addition zweier gleicher Schallpegel (Verdoppelung der Schallleistung) führt zu einem um 3 dB höheren Summenpegel.
- Die Verminderung der Verkehrsstärke einer Straße auf die Hälfte bewirkt einen um 3 dB geringeren Pegel.
- Eine Abstandsverdoppelung bewirkt bei einer punktförmigen Schallquelle eine Verringerung des Schallpegels um 6 dB.

Der Momentanschalldruckpegel ist der augenblickliche Pegelwert eines zeitlich schwankenden Geräusches, angegeben z. B. als  $L_{AF}(t)$  in dB(A).

Der maximale Schalldruckpegel oder Maximalpegel ist der Höchstwert des schwankenden Schalldruckpegelverlaufs innerhalb eines Bezugszeitraums, bezeichnet als  $L_{max}$  in dB. Bei der Frequenzbewertung  $A$  und der Zeitbewertung  $F$  wird der Pegel als  $L_{AFmax}$  bezeichnet und in dB(A) angegeben.

Der Mittelungspegel oder äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  ist der energieäquivalente Mittelwert des zeitlich veränderlichen Schalldruckpegelverlaufs  $L(t)$  innerhalb eines Bezugszeitraums, angegeben in dB. Er wird gebildet nach DIN 45641 [31] oder direkt mittels Messgerät nach DIN EN 61672-1 [22]. Bei der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung F wird der Mittelungspegel als  $L_{AFeq}$  bezeichnet und in dB(A) angegeben.

### Schmalbandspektrum

Siehe Spektralanalyse

### Schwinggeschwindigkeit

Die Schwinggeschwindigkeit (Schnelle) ist die Geschwindigkeit einer schwingenden Masse am Messpunkt in der vorgegebenen Messrichtung, angegeben in Millimeter pro Sekunde (mm/s). Diese Größe ist Grundlage für die Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Gebäude und auf Menschen in Gebäuden. Die Erschütterung ist zunächst durch die Bodenbewegung, also den Schwingweg (Amplitude), als Funktion der Zeit gekennzeichnet. Durch Differenzieren nach der Zeit lässt sich daraus die Schwinggeschwindigkeit ableiten.

### Schwingstärke

In dem für die Wahrnehmung von Erschütterungen relevanten Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz ist die Spürbarkeit überwiegend proportional zur Schwinggeschwindigkeit. Unterhalb von etwa 10 Hz wird die Wahrnehmung zu tieferen Frequenzen hin deutlich geringer. Dies wird bei der Auswertung von Messdaten durch eine spezielle Filterung, die sog. KB-Bewertung nach DIN 4150 Teil 2, berücksichtigt. Beiträge oberhalb 80 Hz werden durch ein Sperrfilter abgeschnitten (Bandbegrenzung), da diese keinen Beitrag zur Wahrnehmung liefern. Das bandbegrenzte, frequenz- und zeitbewertete Signal wird als bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$  bezeichnet. Der während der Beurteilungszeit erreichte höchste Wert, die maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$ , ist eine wichtige Beurteilungsgröße für die Fühlbarkeit von Erschütterungseinwirkungen.

### Spektralanalyse

Die Spektralanalyse ein wichtiges Instrument zur Untersuchung des Schallsignals. Dabei wird das Signal in definierte Frequenzbänder zerlegt und für jedes einzelne Band wird

ein Schallpegel bestimmt. Man unterscheidet zwischen Frequenzbändern absoluter und relativer Bandbreite.

Bei Schmalbandspektren wird der zu analysierende Frequenzbereich in Bänder gleicher absoluter Breite aufgeteilt. Hier in diesem Bericht wurde durchgängig eine Bandbreite von 0,1 Hz verwendet, dadurch konnten die Frequenzstrukturen des Schallsignal hoch aufgelöst abgebildet werden.

Oktav- und Terzspektren (1/3-Oktavspektren) setzen sich aus Frequenzbändern relativer Bandbreite zusammen. Die Mittenfrequenz eines Oktavbandes steht im Verhältnis 1 : 2 zur Mittenfrequenz der benachbarten Bänder; für Terzbänder gilt das Verhältnis 1 : 1,26. Ausgangswert für die Festlegung der Mittenfrequenzen ist die Frequenz 1 000 Hz. Die Frequenzbandbreiten innerhalb von Oktav- oder Terzspektren unterscheiden sich also. Die Terzmittenfrequenzen ab 1 Hz sind: 1 Hz, 1,25 Hz, 1,6 Hz, 2 Hz, 2,5 Hz, 3,15 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6,3 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz, 16 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 31,5 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz usw. – siehe auch [23].

### Terzdarstellung

Darstellung eines Schallsignals in einem Frequenzspektrum. Siehe auch Spektralanalyse und Terzspektrum.

### Terzpegel

Schalldruckpegel innerhalb eines Terzfrequenzbandes. Siehe auch Spektralanalyse.

### Terzspektrum

Frequenzspektrum, bei dem der Frequenzbereich und die entsprechenden Pegelanteile in Terzen aufgeteilt sind. Siehe auch Spektralanalyse.

### Tieffrequente Geräusche

Siehe Anhang A1.1

### Turbulenzintensität

Die Turbulenzintensität (auch Turbulenzgrad genannt) wurde hier gebildet aus dem Mittelwert der Quotienten aus Standardabweichung und arithmetischem Mittel der Windgeschwindigkeit. Sie ist ein Maß für die Schwankung der Windgeschwindigkeit (Böigkeit). Die Turbulenzinten-

**Tabelle A3-1:** Die zur Darstellung der Wahrnehmungsschwelle im Bericht verwendeten Hörschwellenpegel nach [5] und [11]

Quelle	Terzmittenfrequenz	Wahrnehmungsschwellenpegel $W_{\text{Terz}}$
	in Hz	in dB
Schwellenpegel – entnommen aus [11]	1,60	124,0
	2,00	122,0
	2,50	120,0
	3,15	117,0
	4,00	113,0
	5,00	108,5
	6,30	105,0
Schwellenpegel – entnommen aus [5]	8,0	100,0
	10,0	92,0
	12,5	84,0
	16,0	76,0
	20,0	68,5
	25,0	58,7
	31,5	49,5
	40,0	41,1
	50,0	34,0
	63,0	27,5
	80,0	21,5
	100,0	16,5
	125,0	12,1

LUBW

sität wird in Prozent angegeben und ist von vielerlei Einflüssen abhängig, z. B. Bodenrauigkeit, mittlerer Windgeschwindigkeit, atmosphärischer Situation oder Bebauung. Ihre niedrigsten Werte (5 % und weniger) erreicht sie über dem Meer, die höchsten (20 % und mehr) über bebautem Gebiet und Wald [32]. Während die Turbulenzintensität keinen nennenswerten Einfluss auf Messungen im A-Pegelbereich (Hörschall) hat [33], ist dies bei tiefen Frequenzen nicht belegt. Hier ist ein Einfluss durchaus zu erwarten. Einige Hersteller von Windenergieanlagen verknüpfen die Gewährleistungsbedingung für ihre Garantiewerte der Schalleistung an maximale Turbulenzintensitäten bei der Vermessung, z. B. 16 %. Die Turbulenzintensität wird nach DIN EN 61400-11 bestimmt [6].

#### Wahrnehmungsschwelle

Die im Bericht verwendete Wahrnehmungsschwelle setzt sich zusammen aus der Wahrnehmungsschwelle laut Tabelle 2 in DIN 45680 (Entwurf 2013) [5] und Literaturwerten.

Die Werte des Normentwurfs orientieren sich an DIN ISO 226 [29]; sie liegen 10 dB unter der dort angegebenen Hörschwelle. Für Frequenzen von 8 Hz bis 20 Hz werden sie durch die von WATANABE & MØLLER [34] ermittelten Werte ergänzt. Der Verlauf entspricht dem 90 %-Perzentil der Hörschwellenverteilung.

Da im Frequenzbereich unter 8 Hz keine standardisierten Schwellenpegel existieren, wurden für die Darstellungen dieses Messberichts im Bereich von 1,6 Hz bis 8 Hz die Werte der von MØLLER & PEDERSEN vorgeschlagenen Hörschwelle [11, Figure 10] übernommen (**Tabelle A3-1**).

#### Wellenlänge

Bei einer Welle (hier Schallwelle) wird der Abstand von einem „Wellenberg“ zum nächsten „Wellenberg“ oder von „Wellental“ zu „Wellental“ als Wellenlänge bezeichnet (allgemein Abstand eines Punktes zum nächsten Punkt gleicher Phase). Die Wellenlänge steht mit der Frequenz in einem Zusammenhang: Die Wellenlänge ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit geteilt durch die Frequenz der Welle. Schallwellen in Luft sind für das menschliche Gehör im Allgemeinen etwa im Wellenlängenbereich von 2 cm bis knapp 20 m registrierbar.

#### Z-Bewertung

Unbewertetes bzw. lineares Geräusch- bzw. Schallsignal nach DIN EN 61672-1:2003 [22]. Siehe Frequenzbewertung und dB(Z).





# Anhang A4 – Verwendete Messsysteme

Im Folgenden werden die verwendeten Messsysteme und Messgeräte dargestellt. Die eingesetzten Schallpegelmessgeräte erfüllen die Spezifikation für Klasse 1 für Schallpegelmesser nach IEC 61672. Der Dynamikbereich der Mikrofonkapsel Typ 40AZ beträgt laut Herstellerangaben 14 dB(A) bis 148 dB, der nutzbare Frequenzbereich reicht von 0,5 Hz bis 20 kHz. Bei den übrigen verwendeten Mikrofonkapseln reicht der nutzbare Frequenzbereich von 3,15 Hz bis 20 kHz.

## Messungen an Windenergieanlagen (Kap. 4)

- 4 Schallpegel-Messgerätekombinationen DUO Smart Noise Monitor, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO  
Hersteller: 01dB Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ auf schallharter Platte mit Primär- und Sekundärwindschirm nach IEC 61400-11, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte
- 1 Meteorologiesensor, bestehend aus:
  - Luftdruck-, Feuchte- und Temperatursensor Typ DTF 485, Hersteller: Reinhardt System- und Messelectronic GmbH, D-86911 Diessen-Obermühlhausen
  - Windsensor Typ WMT 701, Hersteller: Vaisala GmbH, D-22607 Hamburg
- 1 Schallemissions-Messsystem Typ RoBin  
Hersteller: Wölfel Meßsysteme, D-97204 Höchberg
- 4 Schwingungsmesser Typ SM 6 (triaxial) gemäß DIN 45669, bestehend aus:
  - Sensor Nederland / Wölfel Meßsysteme
  - Speisung und AD-Wandlung: System Red Sens mit Funkmodulen
  - Ankopplung der Messaufnehmer nach DIN 45669-2Die Messkette wurde vor und nach der Messung überprüft.
- 1 Messdatenerfassungssystem, bestehend aus:
  - Notebook Dell Latitude mit Elovis Funkantenne

für Red Sens

- Mess- und Auswertesoftware MEDA
- Abtastung: Obere Grenzfrequenz, 400 Hz, entspricht Abtastrate von 976,6 µs; Hersteller: Wölfel Meßsysteme, D-97204 Höchberg

## Straßenverkehrsmessungen (Kap. 5.1)

- 1 Schallpegel-Messgerätekombination DUO Smart Noise Monitor, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO  
Hersteller: 01dB Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ auf schallharter Platte mit Primär- und Sekundärwindschirm nach IEC 61400-11, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte
- 2 Schallpegelmessgerätekombinationen DUO Smart Noise Monitor bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO, Hersteller: 01dB Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte
- 1 Meteorologiesensor, bestehend aus:
  - Luftdruck-, Feuchte-, Temperatur- und Windsensor Typ WXT 520, Hersteller: Vaisala GmbH, D-22607 Hamburg

## Dauermessstationen Straßenverkehr LUBW (Kap. 5.2)

- 2 Schallpegelmessgerätekombination DUO Smart Noise Monitor, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO  
Hersteller: 01dB Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40CD, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte
- 2 Meteorologiesensoren, bestehend aus:
  - Niederschlagswächter Model 5.4103.10.00  
Hersteller: Adolf Thies GmbH & Co. KG, D-37083 Göttingen
  - Temperatur und Luftfeuchtesensor Typ HMP 155, Hersteller: Vaisala GmbH, D-22607 Hamburg

- Ultrasonic Anemometer Typ 85004, Hersteller:  
R. M. Young Company, USA-2801 Aero Park Drive

- Norsonic AS, N-3421 Lierskogen
- Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ, Hersteller:  
G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte

#### **Messungen Autobahn (Kap. 5.3)**

- 3 Schallpegel-Messgerätekombinationen Typ NOR 140, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ Nor 140, Hersteller:  
Norsonic AS, N-3421 Lierskogen
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 1225, Hersteller:  
Norsonic AS, N-3421 Lierskogen

- 1 Schallpegelmessgerätekombination Typ NOR 140, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ Nor 140, Hersteller:  
Norsonic AS, N-3421 Lierskogen
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 1225, Hersteller:  
Norsonic AS, N-3421 Lierskogen

#### **Messungen Innengeräusch Pkw, Kleinbus (Kap. 5.4)**

- 1 Schallpegelmessgerätekombination Typ NOR 140, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ Nor140, Hersteller:  
Norsonic AS, N-3421 Lierskogen
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 1225, Hersteller:  
Norsonic AS, N-3421 Lierskogen

#### **Messungen in ländlicher Umgebung (Kap. 8.1)**

- 2 Schallpegel-Messgerätekombinationen DUO Smart Noise Monitor, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO  
Hersteller: 01dB Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ auf schallharter Platte mit Primär- und Sekundärwindschirm nach IEC 61400-11, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte

#### **Messung städtischer Hintergrund (Kap. 6)**

- 2 Schallpegel-Messgerätekombinationen Typ DUO Smart Noise Monitor, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO, Hersteller:  
01dB-Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ auf schallharter Platte mit Primär- und Sekundärwindschirm nach IEC 61400-11, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte

- 1 Schallpegel-Messgerätekombinationen DUO Smart Noise Monitor, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO  
Hersteller: 01dB Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ auf schallharter Platte mit Primärwindschirm nach IEC 61400-11, Hersteller: G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte

- 1 Schallpegel-Messgerätekombination DUO Smart Noise Monitor bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ DUO, Hersteller:  
01dB-Metravib SAS, F-69760 Limonest
  - Freifeldmikrofon 1/2" Typ 40AZ, Hersteller:  
G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, DK-2840 Holte

- 1 Meteorologiesensor, bestehend aus:
  - Luftdruck-, Feuchte-, Temperatur- und Windsensor Typ WXT 520, Hersteller: Vaisala GmbH, D-22607 Hamburg

- 1 Meteorologiesensor, bestehend aus:
  - Luftdruck-, Feuchte-, Temperatur- und Windsensor Typ WXT 520, Hersteller: Vaisala GmbH, D-22607 Hamburg

#### **Messungen in einem Wohngebäude (Kap. 7)**

- 1 Schallpegelmessgerätekombination Typ NOR 140, bestehend aus:
  - Schallpegelanalysator Typ Nor 140, Hersteller:

#### **Anmerkung zum Eigenrauschen der Messkette**

Zur Bestimmung der Mindest-Rauschgrenze der eingesetzten Schallmesskette wurden an zwei unterschiedlichen Standorten im Nachtzeitraum Schallpegelmessungen im Inneren von Gebäuden durchgeführt. Die Messorte waren so gewählt, dass möglichst geringe Störgeräusche vorlagen. Die gemessenen Werte liegen im Bereich von 1 Hz bis 1 kHz mindesten 20 dB unter den hier zu bestimmenden Schallpegeln. Der Einfluss des Eigenrauschens der Messkette auf die Messergebnisse ist somit vernachlässigbar.



